

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Goran Stunjek

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

prof. dr. sc. Dražen Lončar, dipl. ing.

Student:

Goran Stunjek

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Draženu Lončaru i asistentu Anti Marušiću na uloženom trudu i pomoći prilikom pisanja ovog rada.

Goran Stunjek



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Goran STUNJEK**

Mat. br.: 0035195508

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**POGON SOLARNE TERMOELEKTRANE S RAZLIČITIM
TOPLINSKIM SPREMNICIMA**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**SOLAR THERMAL POWER PLANT OPERATION WITH
DIFFERENT HEAT STORAGEES**

Opis zadatka:

Nakon nekoliko godina stagnacije u porastu su investicije u solarne termoelektreane većih snaga. Zahvaljujući primjeni toplinskih spremnika uočava se značajan potencijal za izgradnju u manje razvijenim energetske sustavima zbog mogućnosti proizvodnje električne energije i nakon zalaska sunca. Glavna odlika solarnih termoelektrana je mogućnost pohrane solarne energije u vidu visoko-temperaturne osjetne ili latentne topline unutar posebnih toplinskih spremnika ispunjenih tzv. solarnim solima.

Na temelju trenutnog stanja tehnologije spremnici energije isključivo se temelje na pohrani osjetne topline zbog male toplinske vodljivosti solarnih soli koja ograničava maksimalnu snagu pražnjenja/punjenja spremnika iako latentni spremnici imaju značajne prednosti kao što su veća gustoća pohrane i izotermno oslobađanje topline.

U okviru rada potrebno je:

1. Izvesti kvazistacionarni model solarne termalne elektrane snage 1 MW
2. Izvesti model dinamike dvaju različitih toplinskih spremnika – latentnog i osjetnog istog kapaciteta
3. Simulacijski usporediti rad elektrane u realnim uvjetima prilikom korištenja različitih spremnika topline

U tekstu završnog rada potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualnu pomoć pri izradi.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.

3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.

3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Dražen Lončar

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA.....	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD	1
1.1. Energetska tranzicija nakon COP21	1
1.2. Solarna energija kroz povijest	1
1.3. Usporedba sunčeve koncentrirane snage i solarnih panela	2
2. SOLARNA TERMoeLEKTRANA S KONCENTRACIJOM SUNČEVOG ZRAČENJA	5
2.1. Općenito.....	5
2.2. Tipovi postrojenja	6
2.3. Organski Rankineov ciklus u solarnoj termoelektrani	7
3. TOPLINSKI SPREMNICI	9
3.1. Općenito i podjela	9
3.2. Osjetni spremnici topline	11
3.2.1. Direktni osjetni spremnik topline	11
3.2.2. Indirektni osjetni spremnik topline.....	13
3.2.3. Termoklinski osjetni toplinski spremnik	14
3.2.4. Termoklinski osjetni toplinski spremnik s mješovitim medijem.....	14
3.3. Kemijski spremnici topline (sorpcijski).....	15
3.4. Latentni toplinski spremnici.....	17
3.5. Primjena toplinskih spremnika u solarnim termoelektranama	22
4. DIMENZIONIRANJE LATENTNOG SPREMNIKA TOPLINE	25
5. DIMENZIONIRANJE OSJETNOG SPREMNIKA TOPLINE	33
6. MATEMATIČKI MODEL SPREMNIKA TOPLINE.....	36
6.1. Bilance energije latentnog toplinskog spremnika.....	38
6.1.1. Bilanca energije za radni fluid (XCEL THERM®LV)	38
6.1.2. Bilanca energije za stijenku cijevi.....	39
6.1.3. Bilanca energije za odsječke PCM – a u radijalnom smjeru.....	40
40	
6.2. Toplinski tokovi latentnog toplinskog spremnika	41
6.2.1. Toplinski tok radni medij – stijenka	41
6.2.2. Toplinski tok stijenka – prvi odsječak u radijalnom smjeru	42
6.2.3. Toplinski tok prvi – drugi i drugi - treći odsječak	43
6.2.4. Toplinski tok treći odsječak – okoliš.....	44

6.3. Bilance energije osjetnog toplinskog spremnika	44
6.4. Toplinski tokovi osjetnog toplinskog spremnika	45
7. REZULTATI SIMULACIJE OSJETNOG SPREMNIKA TOPLINE	46
8. REZULTATI SIMULACIJE LATENTNOG SPREMNIKA TOPLINE.....	51
9. ZAKLJUČAK	60
DODATAK.....	61
LITERATURA.....	66

POPIS SLIKA

Slika 1.	Prvo CSP postrojenje snage 74.6 kW postavljeno u Egiptu za pogon pumpi za navodnjavanje konstruktora Franka Shumana (tzv. Solar Engine One)[3]	2
Slika 2.	Procjena cijene struje iz CSP-a temeljem programa Sun Shot[40].....	4
Slika 3.	Direktno sunčevo zračenje[10].....	5
Slika 4.	CSP tehnologije, Parabolična ogledala (lijevo), Solarni toranj (desno, gore),.....	7
Slika 5.	T,s dijagram izopentana kao radnog fluida u ORC ciklusu[11]	8
Slika 6.	Prikaz postrojenja s direktnim osjetnim spremnikom topline[20].....	12
Slika 7.	Prikaz postrojenja s indirektnim osjetnim toplinskim spremnikom[21]	13
Slika 8.	Termoklinski osjetni spremnik s plutajućom pregradom[22]	14
Slika 9.	Termoklinski osjetni toplinski spremnik s mješovitim medijem[22]	15
Slika 10.	Shematski prikaz kemijske reakcije u toplinskom spremniku[23]	16
Slika 11.	Usporedni prikaz količine skladištene energije u T,s dijagramu za latentni i osjetni spremnik s jednakim specifičnim toplinskim kapacitetima.....	18
Slika 12.	Kruti višeslojni materijal sa faznom promjenom (MLSPCM)[25]	21
Slika 13.	Mjere povećanja toplinske provodnosti. Postavljanje fazno promjenjivog materijala u kapsule (lijevo). Stvaranje kompozita materijala s faznom pretvorbom i grafita (desno)[26].....	22
Slika 14.	Prikaz gradnje toplinskog spremnika "Noor 1" postrojenja od 160 MW[30]	24
Slika 15.	Termička iskoristivost paraboličkih kolektora[33]	26
Slika 16.	Karakteristični profil zračenja sunca[31]	27
Slika 17.	Prikaz modela dobivanja potrebnog masenog protoka HTF-a.....	28
Slika 18.	Maseni protok radnog fluida za održavanje konstantne temperature na izlazu iz kolektora.....	28
Slika 19.	Prikaz toplinskog toka kojeg predaje sunce i koji je potreban za rad generatora pare uz prikaz energije koja se koristi za dimenzioniranje toplinskog spremnika	30
Slika 20.	3D prikaz podjele referentne cijevi na odsječke u aksijalnom i radijalnom smjeru	36
Slika 21.	Prikaz odsječaka medija za pohranu toplinske energije u radijalnom smjeru	36
Slika 22.	Prikaz tokova energije za radni fluid	38
Slika 23.	Prikaz tokova energije za stijenku	39
Slika 24.	Prikaz tokova energije za medij pohrane toplinske energije	40
Slika 25.	Temperaturni profil radnog fluida po odsječcima u aksijalnom smjeru	46
Slika 26.	Temperaturni profil prvih odsječaka u radijalnom smjeru, prikazani u aksijalnom smjeru.....	47
Slika 27.	Temperaturni profil drugih odsječaka u radijalnom smjeru, prikazani u aksijalnom smjeru	48
Slika 28.	Temperaturni profil trećih odsječaka u radijalnom smjeru, prikazani u aksijalnom smjeru	48
Slika 29.	Temperaturni profil medija za pohranu toplinske energije u radijalnom smjeru prikazan za prvi odsječak u aksijalnom smjeru	49
Slika 30.	Temperaturni profil medija za pohranu toplinske energije u radijalnom smjeru prikazan za peti odsječak u aksijalnom smjeru	49
Slika 31.	Prikaz toplinskog toka koji se dobiva iz kolektorskog polja i toplinskog spremnika uz prikaz potrebnog toplinskog toka za stacionarni rad generatora pare	50
Slika 32.	Temperaturni profil radnog fluida po odsječcima u aksijalnom smjeru	51

Slika 33.	Temperaturni profil prvih odsječaka u radijalnom smjeru, prikazani u aksijalnom smjeru	52
Slika 34.	Temperaturni profil drugih odsječaka u radijalnom smjeru, prikazani u aksijalnom smjeru	52
Slika 35.	Temperaturni profil trećih odsječaka u radijalnom smjeru, prikazani u aksijalnom smjeru	53
Slika 36.	Temperaturni profil medija za pohranu toplinske energije u radijalnom smjeru prikazan za prvi odsječak u aksijalnom smjeru	54
Slika 37.	Detalj A – punjenje spremnika za medij u radijalnom smjeru za prvi odsječak u aksijalnom smjeru.....	54
Slika 38.	Detalj B – pražnjenje spremnika za medij u radijalnom smjeru za prvi odsječak u aksijalnom smjeru.....	55
Slika 39.	Temperaturni profil medija za pohranu toplinske energije u radijalnom smjeru prikazan za drugi odsječak u aksijalnom smjeru	55
Slika 40.	Detalj C – punjenje spremnika za medij u radijalnom smjeru za drugi odsječak u aksijalnom smjeru.....	56
Slika 41.	Detalj D – pražnjenje za medij u radijalnom smjeru za drugi odsječak u aksijalnom smjeru	56
Slika 42.	Temperaturni profil medija za pohranu toplinske energije u radijalnom smjeru prikazan za treći odsječak u aksijalnom smjeru	57
Slika 43.	Temperaturni profil medija za pohranu toplinske energije u radijalnom smjeru prikazan za četvrti odsječak u aksijalnom smjeru	57
Slika 44.	Temperaturni profil medija za pohranu toplinske energije u radijalnom smjeru prikazan za peti odsječak u aksijalnom smjeru	58
Slika 45.	Prikaz toplinskog toka koji se dobiva iz kolektorskog polja i toplinskog spremnika uz prikaz potrebnog toplinskog toka za stacionarni rad generatora pare	59
Slika 46.	Simulink model radnog medija (<i>HTF</i>)	63
Slika 47.	Simulink model stijenke cijevi	64
Slika 48.	Simulink model odsječaka u radijalnom smjeru	65

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Prikaz parametara različitih spremnika kapaciteta 15 MWh[13].....	12
Tablica 2.	Prikaz parametara različitih spremnika kapaciteta 15 MWh [13].....	13
Tablica 3.	Prikaz parametara različitih spremnika kapaciteta 15 MWh [13].....	15
Tablica 4.	Materijali za kemijsko skladištenje topline i njene kemijske reakcije[24]	16
Tablica 5.	Materijali latentnih spremnika topline[24]	20
Tablica 6.	Svojstva radnog fluida[32]	25
Tablica 7.	Svojstva materijala fazne pretvorbe[34]	29
Tablica 8.	Rezultati dimenzioniranja spremnika.....	32
Tablica 9.	Svojstva medija za pohranu toplinske energije u osjetnom spremniku topline ...	33
Tablica 10.	Rezultati dimenzioniranja osjetnog spremnika topline.....	35

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
Φ_{GP}	MW	Toplinski tok potreban za rad generatora pare
C_{HTF}	J/kgK	Specifični toplinski kapacitet radnog medija
ϑ_u	°C	Temperatura ulaza radnog medija u generator pare i toplinski spremnik
ϑ_{iz}	°C	Temperatura izlaza radnog medija iz generator pare
Q	GJ	Toplinska energija potrebna za trosatno produljenje rada
t_1	s	Vrijeme početka punjenja toplinskog spremnika
t_2	s	Vrijeme kraja punjenja toplinskog spremnika
PCM	-	Materijal fazne pretvorbe kod latentnog spremnika topline
Φ_{sol}	MW	Toplinski tok kolektorskog polja
M_{PCM}	t	Masa medija za pohranu kod latentnog spremnika topline
$c_{p,k}$	J/kgK	Specifični toplinski kapacitet krute faze PCM - a
$c_{p,t}$	J/kgK	Specifični toplinski kapacitet kapljevite faze PCM - a
r	J/kg	Latentna toplota PCM – a
ϑ_t	°C	Temperatura fazne pretvorbe PCM – a
V_{PCM}	m ³	Volumen materijala fazne pretvorbe
d_{PCM}	mm	Promjer materijala fazne pretvorbe oko referentne cijevi
L	m	Duljina (visina) spremnika topline
N	-	Broj cijevi
ρ_{PCM}	kg/m ³	Gustoća medija fazne pretvorbe
M_{osj}	t	Masa medija za pohranu kod osjetnog spremnika topline
c_p	J/kgK	Specifični toplinski kapacitet medija za pohranu osjetnog spremnika topline
V_{osj}	m ³	Volumen medija za pohranu topline osjetnog spremnika topline
d_{osj}	mm	Promjer medija za pohranu toplinske energije osjetnog spremnika
ρ_{osj}	kg/m ³	Gustoća osjetnog medija za pohranu toplinske energije
D_1	mm	Unutarnji promjer stijenke cijevi
D_2	mm	Vanjski promjer stijenke cijevi
D_3	mm	Promjer medija za pohranu toplinske energije
δ	mm	Debljina odsječka medija za pohranu topline u radijalnom smjeru
i	-	Numeracija odsječka u aksijalnom smjeru
j	-	Numeracija odsječka u radijalnom smjeru
ϑ_{ij}	°C	Temperatura odsječka medija za pohranu toplinske energije

$M_{HTF,o}$	t	Masa radnog medija u jednom odsječku
ϑ_i	°C	Temperatura radnog medija
m_{HTF}	kg/s	Protok radnog medija u toplinski spremnik
Φ_i	W	Toplinski tok između radnog medija u stijenke cijevi
$M_{s,o}$	t	Masa stijenke cijevi u jednom odsječku
$c_{p,s}$	J/kgK	Specifični toplinski kapacitet čelične stijenke
$\vartheta_{s,i}$	°C	Temperatura odsječka stijenke cijevi
$\Phi_{s,i}$	W	Toplinski tok između vanjske stijenke cijevi i prvog radijalnog odsječka
$M_{PCM,o}$	t	Masa medija fazne pretvorbe u jednom odsječku
$h_{PCM,i,j}$	J/kg	Entalpija medija fazne pretvorbe u odsječcima
$\Phi_{i,j}$	W	Toplinski tok između medija za pohranu toplinske energije
$T_{PCM,i,j}$	°C	Temperatura medija fazne pretvorbe u odsječcima
α_u	W/m ² K	Koeficijent prijelaza topline na unutarnjoj stijenci cijevi
λ_s	W/mK	Toplinska provodnost čelične cijevi
λ_{ef}	W/mK	Efektivna toplinska provodnost
λ_{ekv}	W/mK	Ekvivalentna toplinska provodnost
$\lambda_{i,j}$	W/mK	Toplinska provodnost medija fazne pretvorbe u odsječcima
$x_{i,j}$	-	Udio krute faze medija za pohranu toplinske energije u odsječcima
$h_{kraj,t}$	J/kg	Entalpija medija fazne pretvorbe na kraju taljenja
α_v	W/m ² K	Koeficijent prijelaza topline na vanjskoj stijenci cijevi
$M_{osj,o}$	t	Masa osjetnog medija za pohranu toplinske energije u jednom odsječku
$c_{p,osj}$	J/kgK	Specifični toplinski kapacitet osjetnog medija
λ_l	W/mK	Toplinska provodnost kapljevite faze

SAŽETAK

Zbog intermitentne prirode i mogućnosti rada samo tijekom dnevnih sati sve novo izgrađene solarne termoelektrane koriste tehnologiju pohrane toplinske energije. Zahvaljujući primjeni toplinskih spremnika, investiranje u solarne termoelektrane postaje sigurnije i investicijski opravdano. Toplinski spremnici omogućuju produljenje rada solarnih termoelektrana, osiguravaju stabilnost pogona i mogućnost proizvodnje prema zahtjevima potrošača. Toplinski spremnik omogućuje dugotrajniji rad termoelektrane kao i mogućnost pokrivanja vršnih opterećenja, a njihovom primjenom podiže se razina konkurentnosti solarnih termoelektrana naspram drugih tehnologija koje se baziraju na iskorištavanju obnovljivih izvora energije te naspram postrojenja koja koriste fosilna goriva. Zbog navedenog sve veći značaj posvećuje se razvijanju tehnologije pohrane toplinske energije, usavršavanju konstrukcijskih rješenja te unapređenju njihovih dinamičkih značajki (specifičnim snagama punjenja i pražnjenja). Na temelju tehnologije pohrane energije navedeni spremnici dijele se na latentne i osjetne.

U ovom radu napravljen je jednostavni matematički model i simulacija rada dva spremnika temeljena na navedenim tehnologijama. Simulacije su provedene uz jednake rubne uvijete kako bi se omogućila usporedba radnih karakteristika obiju tehnologija. U nastavku rada prikazani su rezultati usporedbe te su kvantificirane prednosti i nedostaci pojedine tehnologije. Okvirni proračun spremnika i solarnog postrojenja, matematički model i simulacija napravljeni su korištenjem računalnog paketa Matlab, programa Matlab i Simulink. Rubni uvjeti postavljeni su tako da okvirno odgovaraju solarnoj termoelektrani električne snage 1 MW temeljene na tehnologiji paraboličnih kolektora.

Ključne riječi: obnovljivi izvori energije, solarna energija, solarne termoelektrane, visokotemperaturni toplinski spremnici, CSP

SUMMARY

To overcome intermittent nature and energy production only when the sun shines, thermal energy storage is used. Investments in solar thermal power plants are rising due to the utilization of thermal energy storage (TES). Usage of TES allows extension of energy production, makes production rate more stable and allows production of energy based on consumer needs. Likewise, solar thermal power plant can work as base and peak load power plant. Utilization of TES makes solar thermal power plants competitive compared to the other energy production technologies based on renewable energy sources as well as those that use fossil fuels. Hence, the great importance of contributing the development of TES is needed and the most studied types are latent and sensible heat storages.

This article presents analysis and comparison of those 2 types of TES and represents the characteristics of both, same as their advantages and disadvantages. The analysis of TES is conducted in Matlab software and the characteristics of TES are simulated in Simulink software. The characteristics of TES are represented for solar thermal power plant with 1 MW electric power output.

Key words: renewable energy sources, solar energy, Concentrating solar power, thermal energy storage

1. UVOD

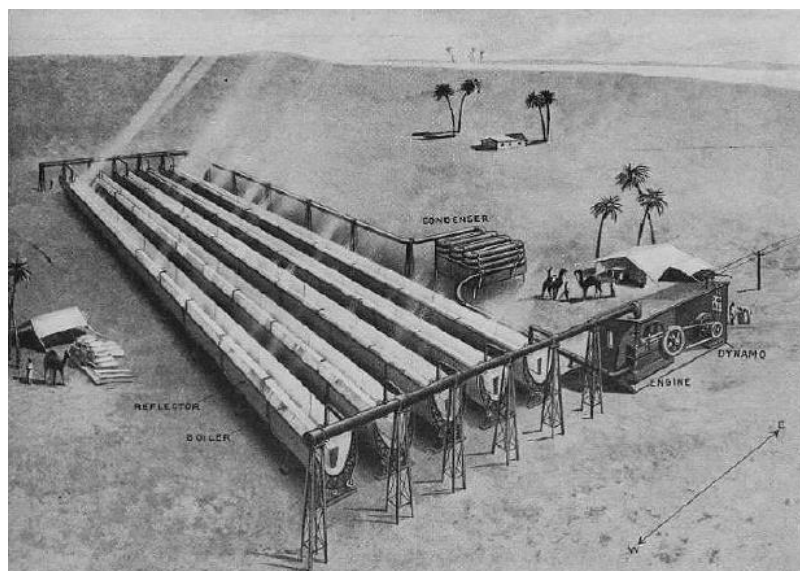
1.1. Energetska tranzicija nakon COP21

Novi Sporazum o klimi, koji si kao cilj postavlja ograničenje globalnog zagrijavanja na ispod 2 °C u odnosu na predindustrijsko razdoblje uz namjeru na ograničavanje na 1.5°C uz značajni utjecaj svih potpisnika sporazuma, potpisan je 12. prosinca 2015. godine od strane 195 predstavnika država. Zahtjev ograničenja na 1.5 °C tiče se mogućih potapanja otočnih država s povišenjem razine more. Sporazumom se obuhvaćaju razvijene zemlje i zemlje u razvoju s tim da se od razvijenih zemalja traži pomoć u ostvarivanju niskougljičnog razvoja zemalja u razvoju. Indija je jedna od značajnijih država u razvoju na koju se mora utjecati da svoj razvoj vodi niskougljičnom strategijom te da kao izvor svoje potrebe za energijom traži u čistim tehnologijama odnosno obnovljivim izvorima. Tu veliku ulogu mogu i moraju odigrati obnovljivi izvori te kao glavni predstavnici energija vjetra i sunca.[\[1\]](#)

1.2. Solarna energija kroz povijest

Najstariji i najpoznatiji način korištenja sunčeve energije za dobivanje korisne energije je paljenje vatre uz pomoć zakrivljenih ogledala koje su koristili još davni Kinezi, Grci i Rimljani. Kao legenda iz prošlosti spominje se tzv. "Arhimedova zraka smrti" kada je grčki znanstvenik Arhimed uz pomoć brončanih štitova fokusirao sunčeve zraka kako bi zapalio drvene rimske brodove. Kroz povijest gradnja kuća i stambenih prostorija temeljila se na pozicioniranju prozora na južnoj strani kako bi prostorije primale što veći udio sunčevog zračenja i na taj način održavale pogodnu temperaturu prostorije. Znanstvenik Horace de Saussure je 1767. godine izgradio prvi solarni kolektor tzv. "*Heat Box*" gdje je uz pomoć stakla i izoliranih površina uspio postići temperaturu veću od 100 °C te mogao zaključiti da vidljivo sunčevo zračenje lako prolazi kroz staklo, dok je za infracrveno zračenje teže propusno.[\[2\]](#) Edmond Becquerel otkrio je kako zračenjem metala valne duljine veće od granične rezultira izbijanjem elektrona iz metala i postavio temelje fotonaponskih modula. Prvo dokumentirano postrojenje koje je koristilo koncentrirano zračenje sunca za pogon pumpi za navodnjavanje izgrađeno je 1913. godine u Al Meadi u Egiptu, a njen konstruktor je pionir solarne energije Frank Shuman. Još jedan pionir korištenja sunčeve energije je Augustin Bernard Mouchot koji je konstruirao prvi motor pogonjen sunčevom energijom. Poznat je i po izlaganju svojeg djela na Pariškoj izložbi

1878. godine kada je iskoristio sunčevo zračenje za pogon motora za pravljenje leda te je svim uzvanicima ponudio sladoled dobiven iz sunca te je time i zaradio zlatnu medalju na spomenutoj izložbi. Daljnjim razvojem tehnologije i materijala dovelo je do sve veće upotrebe i ugradnje tehnologije za korištenje sunčeve energije. [3] Kako su fotonaponski moduli bili primjenjiviji za male snage, a time i s manjim investicijskim troškovima, razvoj im se kretao brže nego li tehnologije koncentriranog sunčevog zračenja.

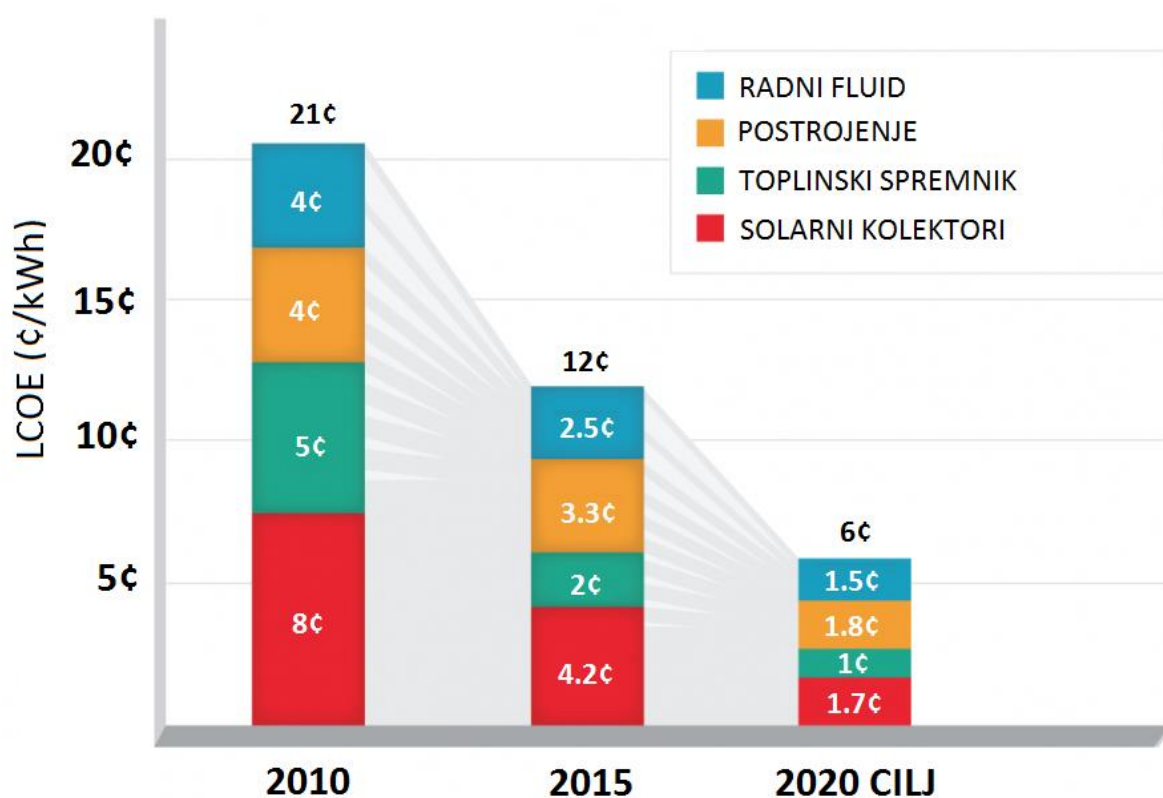


Slika 1. Prvo CSP postrojenje snage 74.6 kW postavljeno u Egiptu za pogon pumpi za navodnjavanje konstruktora Franka Shumana (tzv. Solar Engine One) [3]

1.3. Usporedba sunčeve koncentrirane snage i solarnih panela

U komercijalne svrhe, električna se energija iz sunčeve energije najčešće dobiva korištenjem dviju tehnologija: fotonaponski moduli (eng. *Photo Voltaics – PV*) i solarne termoelektre s koncentracijom sunčevog zračenja (eng. *Concentrating solar power – CSP*). CSP tehnologija se odnosi na koncentriranje sunčevog zračenja kako bi se prijenosnom fluidu ili izravno radnom mediju povećala unutarnja energija koja se kasnije posredno ili neposredno u turbini ili motoru pretvara u mehaničku energiju koja se posredstvom generatora pretvara u električnu. Kod PV modula, sunčevo zračenje direktno se prevodi u električnu energiju koja se generira u PV modulima. PV moduli trenutno su najzastupljenija tehnologija korištenja sunčevog zračenja u svijetu. U 2015. godini postavljeno je 50 GW PV modula u svijetu što čini oko 25% kapaciteta PV modula u prijašnjoj godini. Zaključno s 2015. godinom ukupna instalirana snaga PV modula iznosila je 227 GW te i dalje raste. Najveći ulagač u PV module u

2015. godini bila je Kina s instaliranih 15.2 GW. S druge strane, u 2015. godini instalirano je 420 MW CSP postrojenja što je na kraju godine činilo 4.8 GW ukupno instalirane snage CSP-a. U Maroku se gradi veliko postrojenje ukupne snage 580 MW, a trenutno je instalirano 160 MW od ukupnih 580 MW. Kina si je kao cilj postavila izgradnju 5-10 GW CSP-a do 2020. godine.[\[4\]](#) Jedan od razloga veće primjene PV modula je u mogućnosti instaliranja manjih snaga, dok je CSP primjenjiv za veće snage. Također, PV moduli generiraju struju i pri difuzivnom zračenju dok CSP zahtijeva direktno zračenje što znači da se PV moduli mogu instalirati bilo gdje dok CSP zahtijeva područja s dominantnim direktnim zračenjem. Ovi razlozi doveli su do većeg i bržeg razvoja PV modula naspram CSP – a, dok jednostavnost postavljanja PV – a daje dodatni poticaj njegovu razvoju. Iako se čini kako PV moduli imaju značajnu prednost pred CSP-om, navesti ćemo neke prednosti koje bi u bližoj budućnost, u određenim scenarijima, mogli CSP učiniti znatno konkurentnijim na tržištu. Kao glavna prednost CSP-a navodi se jednostavnija i višestruko jeftinija mogućnost spremanja viška energije dobiveni u solarnom polju. Cijena i vijek trajanja skladištenja topline u toplinskim spremnicima znatno je bolja od skladištenja viška struje u baterije korištenjem PV modula. Korištenjem toplinskih spremnika, postrojenje je stabilnije i može svoju proizvodnju kreirati prema zahtjevima potrošača. Iskoristivost CSP-a duplo je veća od iskoristivosti PV, te je struja dobivena CSP-om izmjenična, a PV modulima istosmjerna, što zahtijeva pretvarače struje.[\[5\]](#) Postoje istraživački programi koji potiču razvoj CSP i u svojim scenarijima pretpostavljaju značajni pad cijene investicije, a time i električne energije. Sun Shot program je jedan od takvih, kojim se za cilj postavlja pad cijene struje iz CSP-a na 6 €/kWh do 2020. godine. Provedena su i istraživanja prema programu Sun Shot, koja daju rezultate gdje je cijena struje iz CSP-a s toplinskim spremnicima najniža uspoređujući je s cijenom struje iz PV postrojenja s baterijama i PV postrojenja s plinskim turbinama.[\[5\],\[6\],\[7\],\[8\]](#)

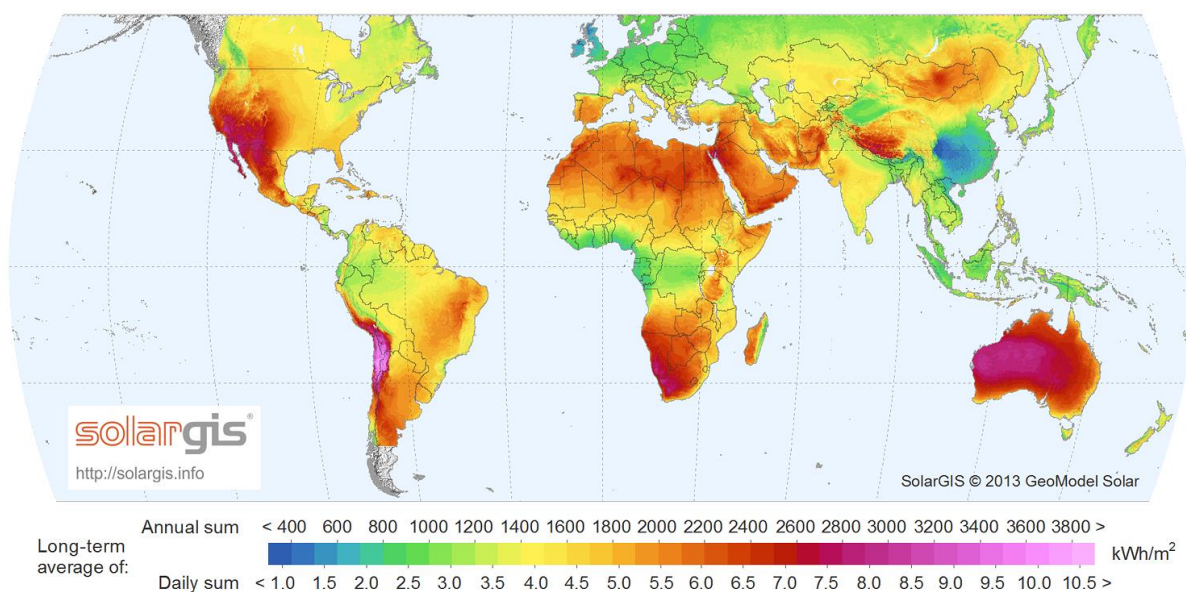


Slika 2. Procjena cijene struje iz CSP-a temeljem programa Sun Shot[\[40\]](#)

2. SOLARNA TERMoeLEKTRANA S KONCENTRACIJOM SUNČEVOG ZRAČENJA

2.1. Općenito

CSP je tehnologija kojom se proizvodi električna energija koristeći koncentrirano sunčevo zračenje. Koncentriranim zračenjem zagrijava se radni fluid koji se u daljnjem procesu koristi kao ogrjevni medij za parnoturbinski proces. Iako se već dugo poznaju svojstva koncentriranog sunčevog zračenja, komercijalna uporaba CSP tehnologije počinje se koristiti 1980-ih godina. Prva veća solarna termoelektrana izgrađena je u Kaliforniji. Za razliku od PV modula, veliku prednost CSP tehnologiji pridonosi ugradnja toplinskih spremnika te u kombinaciji s plinskom turbinom, slična kao i u kombiniranom postrojenju, može održavati stabilni iznos radne snage i temeljiti proizvodnju na zahtjevima potrošača. Trenutačna cijena električne energije iz CSP postrojenja je oko 12 US centa po kWh, a uz daljnji razvoj tehnologije i masovniju upotrebu, očekuje se daljnji pad cijene. Procjenjuje se cijena od 6 US centi po kWh do 2020. godine. Također, najveću cijenu samog postrojenja čine investicijski troškovi, te nakon njenog otplaćivanja (u prosjeku 15 godina) cijena struje bi mogla biti između 2 i 3 US centa po kWh. Kako CSP zahtijeva direktno zračenje sunca (barem 2000 kWh po m² godišnje) pogodna lokacija za njenu primjenu je u području od oko 40° južno i sjeverno od ekvatora.^[9]



Slika 3. Direktno sunčevo zračenje^[10]

Prema istraživanjima IRENA, CPS troši 200 puta manje vode od termoelektrane na ugljen za isti iznos proizvedene struje.[\[9\]](#)

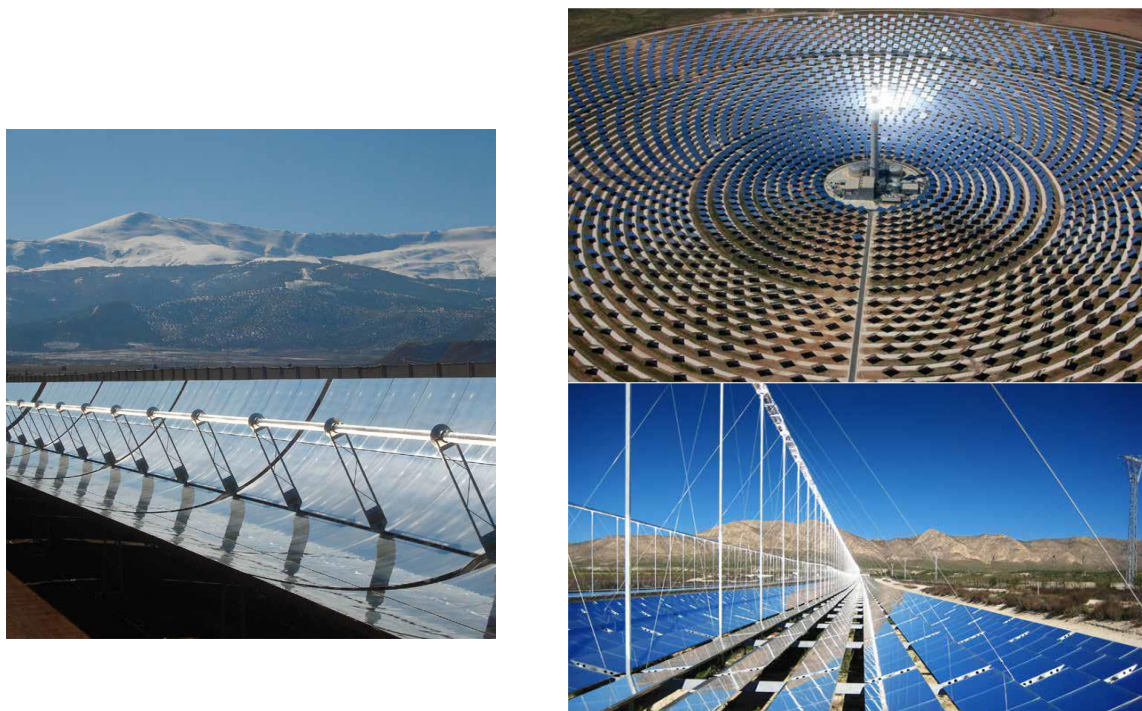
Postoje četiri konstrukcijska rješenja koja se mogu podijeliti prema načinu koncentriranja sunčevog zračenja. Linijsko koncentriranje sunčevih zračenja svojstvo je paraboličnih ogledala i linijskih Fresnel sistema dok je centralno koncentriranje sunčevog zračenja specifično za parabolične tanjure odnosno solarne tornjeve. Trenutno najveći iznos instalirane snage ima Španjolska s iznosom od 2.3 GW.[\[9\]](#)

2.2. Tipovi postrojenja

Parabolična zrcala najkorišteniji su tip tehnologije koncentriranja sunčevog zračenja. Postiže se 70 do 100 puta veća površinska gustoća zračenja na apsorbirajućoj cijevi i temperature između 300 i 550 °C. Najčešći medij za prijenos topline (HTF) je termo ulje koje predaje energiju vodi za daljnji konvencionalni ciklus parno turbinskog postrojenja. Trenutno se najviše postavljaju i najviše ih ima u SAD-u i Španjolskoj, a termoelektrane su u rasponu od 5 do 280 MW. Kako se već duže vrijeme koristi u solarnim termoelektranama smatra se sigurnim odabirom. U razvoju su nove generacije paraboličnih ogledala za ostvarivanje viših temperatura i boljom integracijom s toplinskim spremnicima.[\[9\]](#)

Solarni tornjevi koriste pokretna ogledala koja prate sunčevo zračenje te zračenje fokusira prema vrhu tornja gdje dolazi do značajnog povećanja temperature radnog fluida između 800 i 1000 °C. Sunčevo zračenje na vrhu tornja fokusirano je 600 do 1000 puta. Zračenje se apsorbira od radnog fluida koji energiju prenosi do vode koja isparava i pogoni parnu turbinu. U pravilu je iskoristivost ovog postrojenja bolja od postrojenja s paraboličnim zrcalima jer je sami termodinamički ciklus, zbog veće temperature, veće iskoristivosti. Također zbog više temperature, postrojenja s toplinskim spremnicima imaju manje volumene toplinskih spremnika. Trenutno najveća solarna termoelektrana je termoelektrana sa solarnim tornjem "Ivanpah Solar Electric Generating System" sa snagom od 392 MW.[\[9\]](#)

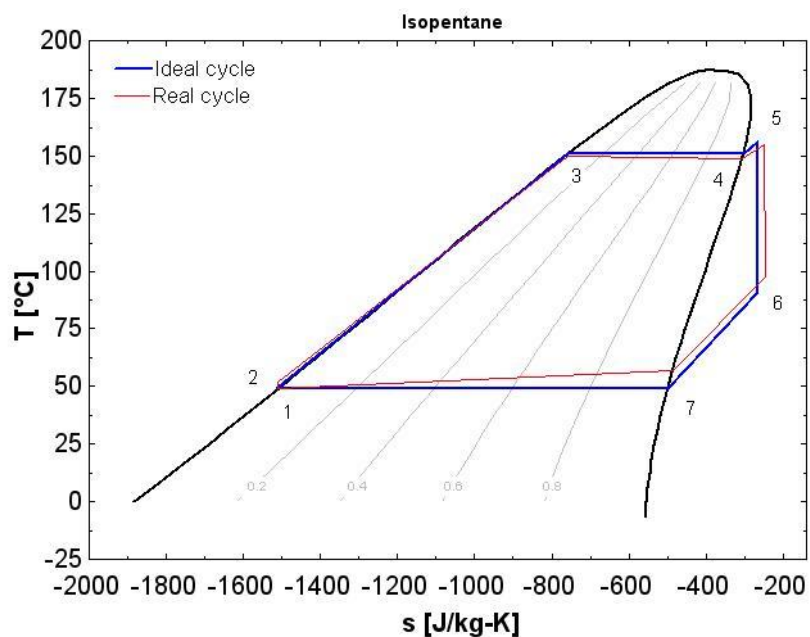
Linearni Fresnel reflektori (LRF) slični su paraboličnim, no luk se postiže od više ravnih pomičnih zrcala. Prednost je jednostavnost i manja cijena komponenata. Kod ove izvedbe voda isparava u kolektorskim cijevima što pojednostavljuje termički ciklus. Uz korištenje u proizvodnji električne energije mogu se koristiti za proizvodnju topline za industrijska postrojenja.[\[9\]](#)



Slika 4. CSP tehnologije, Parabolična ogledala (lijevo), Solarni toranj (desno, gore), LRF (desno, dolje)[\[9\]](#)

2.3. Organski Rankineov ciklus u solarnoj termoelektrani

Organski Rankineov ciklus jednak je običnom Rankineovom ciklusu jedino što je radni fluid organska tvar, visokomolekularne mase s temperaturom isparavanja na nižim temperaturama u usporedbi s vodom u klasičnom Rankineovom ciklusu (visoki tlak vode). Koristi se u procesima gdje je radna temperatura niža kao što je to izgaranje biomase, izgaranje otpada, geotermalni izvori i solarne termoelektrane.[\[11\]](#) Izgled T,s dijagrama daje još jednu prednost organskih medija nad vodom, a to je cijelovremena pregrijana faza tijekom ekspanzije u turbini što znači da zadnji stupnjevi lopatica turbine nisu ograničeni pojavom kapljevite faze.



Slika 5. T,s dijagram izopentana kao radnog fluida u ORC ciklusu [\[11\]](#)

Iako u ovom radu radni fluid neće biti organski medij, u smislu da će on vršiti ekspanziju u turbini, već će to vršiti voda u parno turbinskom procesu, dobra svojstva organskih fluida koristit ćemo kao fluid za prijenos topline do vode koja će posredstvom izmjenjivača topline isparavati. Dobro svojstvo organskih medija je da na temperaturama oko $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ nema značajnijeg porasta tlaka kao što je to kod vode. Zbog toga u konstrukciji solarnog kolektora nije potrebno koristiti visokotlačne cijevi što smanjuje cijenu postrojenja.

3. TOPLINSKI SPREMNICI

3.1. Općenito i podjela

Toplinski spremnik naziv je za spremnik koji služi za privremeno skladištenje topline na određenoj temperaturi za kasnije korištenje. Najčešća upotreba im je u osiguranju stabilnosti pogona, produljenju rada postrojenja i mogućnosti proizvodnje prema zahtjevima potrošača.[\[9\]](#) Toplina koja se pohranjuje može biti višak energije koji se dobiva u postrojenju, što je i slučaj sa solarnim termoelektranama koje se namjerno predimenzioniraju kako bi mogle biti u pogonu nekoliko sati dnevno te se sav višak energije sprema u toplinski spremnik. Također, toplina može biti i toplina koja se baca u okoliš iz industrijskih postrojenja koja kasnije može poslužiti za grijanje istog postrojenja. Toplina se u spremnik može pohranjivati i kada je cijena njene proizvodnje niska što kao rezultat daje bolju ekonomičnost sustava. Skladištena toplina može se koristiti za grijanje prostora, zagrijavanje potrošne tople vode i za proizvodnju električne energije. Primjenom toplinskih spremnika u termoelektranama omogućuje se bazni rad termoelektrane, kao i mogućnost pokrivanja vršnih opterećenja.[\[9\]](#) Postoje i tzv. banke leda gdje se noću kada je električna energija jeftinija, proizvodi led te se kasnije, danju, koristi za hlađenje prostorija.[\[12\]](#) Primjena toplinskih spremnika u proizvodnji električne energije omogućuje konkurentnost CSP sustava naspram plinskim postrojenjima i drugim obnovljivim izvorima.[\[8\]](#) Još je 1904. godine Henry E. Willsie primijetio slabost prijašnjih konstrukcija motora na solarnu energiju zbog intermitencije sunčevog zračenja. Vjerovao je da motori razvijeni za rad pogonjeni sunčevom energijom mogu raditi i danju i noću, kada je lijepo vrijeme i kada sunce sja, samo uz dodatak spremnika topline koji bi to mogao omogućiti. Konstruirao je izolirani spremnik s vodom koju je zagrijavao uz pomoć kolektora te kasnije, noću, koristio za pogon motora.[\[3\]](#)

Toplinski spremnici trenutno su integrirani dio gotovo svake novo izgrađene solarne termoelektrane zbog svih svojih značajnih svojstava.[\[9\]](#) Značajnu prednost toplinski spremnici pridaju CSP tehnologiji naspram drugih konkurentnih obnovljivih tehnologija kao što su to PV moduli. Trenutno je cijena električne energije iz CSP postrojenja 2 puta viša od cijene električne energije iz PV modula, no smatra se da će CSP ukomponiran s toplinskim spremnikom, u skoroj budućnosti, biti u mogućnosti konkurirati PV modulima, pa čak i nekim oblicima fosilnih goriva. Značajna prednost pridodaje se skladištenju energije u obliku topline za razliku od skladištenja električne energije koje je poprilično skupo.[\[8\]](#) Solarna

termoelektrana konstruira se na način da se površina solarnog polja povećava do razine optimalnog dnevnog rada elektrane. To se temelji na zahtjevima generatora pare za traženu proizvodnju pare, a u konačnici proizvodnju električne energije. Sav višak energije prikupljen u kolektorskom polju potrebno je negdje odvesti. Tu se kao najkorisnije rješenje postavlja primjena toplinskih spremnika.

Odabir tipa spremnika temelji se na potrebnom temperaturnom rasponu, tipu postrojenja, o udjelu korištenja spremnika u dnevnoj proizvodnji te o cijeni samo konstrukcije. Odabir se može razmatrati kroz tri kriterija, ekonomska isplativost, utjecaj na okoliš i kao najbitniji, tehnički kriteriji. U tehničke kriterije najčešće spadaju svojstva materijala za skladištenje energije. Tako materijal za skladištenje topline mora biti mehanički i kemijski postojan, mora imati što veći toplinski kapacitet i gustoću, te što bolju toplinsku provodnost. Veći specifični toplinski kapacitet rezultira manjom konstrukcijom i volumenom toplinskog spremnika što značajno može utjecati na investicijski trošak postrojenja. Mora biti temperaturno stabilan u temperaturnom rasponu rada postrojenja te ne smije doći do njegovog degradiranja uslijed previsoke temperature. Također se mora osigurati što veći broj ciklusa rada toplinskog spremnika, odnosno omogućiti što bolju reverzibilnost procesa s vremenom. Ne smije biti agresivan prema drugim materijalima. To se najviše odnosi na materijale izmjenjivačkih cijevi i stjenke samog toplinskog spremnika. Ako dolazi u kontakt s visokotemperaturnim fluidom koji prenosi toplinu, ne smije stvarati štetnu, zapaljivu ili toksičnu smjesu. Poželjno je da materijal štetno ne utječe na okoliš, a ako takav utjecaj postoji, potrebno je osigurati mjere sigurnosti protiv curenja ili pucanja stijenke spremnika. U konačnici, prilikom konstruiranja spremnika, u obzir se moraju uzeti svi faktori te je uz tehničke kriterije potrebno osigurati ekonomsku isplativost koja je vezana i uz odabir materijala. Zahtjevi za materijalom, odnosno tehnički zahtjevi uvelike obuhvaćaju faktore sigurnosti prema okolišu.

Glavni tipovi spremnika mogu se podijeliti u 3 kategorije prema različitim načinima skladištenja topline:[\[13\]](#)

- Osjetni spremnici topline
- Latentni spremnici topline
- Kemijski spremnici topline (sorpcijski)

3.2. Osjetni spremnici topline

Određuje ih tip pohrane energije u obliku unutarnje energije bez promjene agregatnog stanja korištenog materijala za pohranu. Materijal pohrane može biti u tekućem ili krutom stanju. Kako je udio pohranjene energije izražen jedino preko unutarnje energije materijala za pohranu, jedini način povećanja kapaciteta pohranjene energije za isti materijal (za isti specifični toplinski kapacitet) je ili povećanje ukupne mase, odnosno volumena spremnika ili povećanje temperaturne razlike. To također dovodi do glavnog nedostatka osjetnih spremnika, a to je da ne mogu odavati toplinu pri konstantnoj temperaturi te da imaju manju specifičnu gustoću pohrane energije. Relativno su jednostavne izvedbe i materijali su jeftiniji i lako dostupni. Postoji nekoliko načina skladištenja topline u obliku osjetne topline, odnosno unutarnje energije medija bez promjene agregatnog stanja, a to su:

- Direktni osjetni spremnici topline koji predstavlja najjednostavniji način skladištenja topline i pogodan je za postrojenja manjih kapaciteta. Efikasnost ovisi o korištenom visokotemperaturnom mediju
- Indirektni osjetni spremnici topline koji se koriste kod postrojenja većih kapaciteta i dokazana je dobra iskoristivost i pouzdanost
- Termoklinski osjetni spremnici topline koji se još uvijek razvijaju te se proučavaju novi materijali kako bi se smanjila cijena spremnika
- Termoklinski osjetni spremnici topline s mješovitim medijem

U nastavku su prikazani rezultati različitih izvedbi toplinskih spremnika za iznos energije skladištenja od 15MWh prema [\[13\]](#).

3.2.1. Direktni osjetni spremnik topline

Kod ovog pristupa medij koji se koristi kao visokotemperaturni radni medij koristi se i kao medij za skladištenje topline. Radni medij koji je ujedno i medij za skladištenje topline, skladišti se u izolirani spremnik. Svojstva skladištenja topline ovise o volumenu spremnika, toplinskim svojstvima visokotemperaturnog radnog medija i temperaturnoj razlici tople i hladne struje. Prilikom punjenja spremnika, dio protoka radnog fluida skladišti se u izolirani toplinski spremnik gdje mu se održava visoka temperatura. Kako se hladni fluid prilikom pražnjenja ne bi pomiješao s toplim tokom, potrebno je osigurati još jedan spremnik za hladni radni fluid.[\[13\],\[14\]](#) Kapacitet skladištenja toplinske energije spremnika može se izračunati:

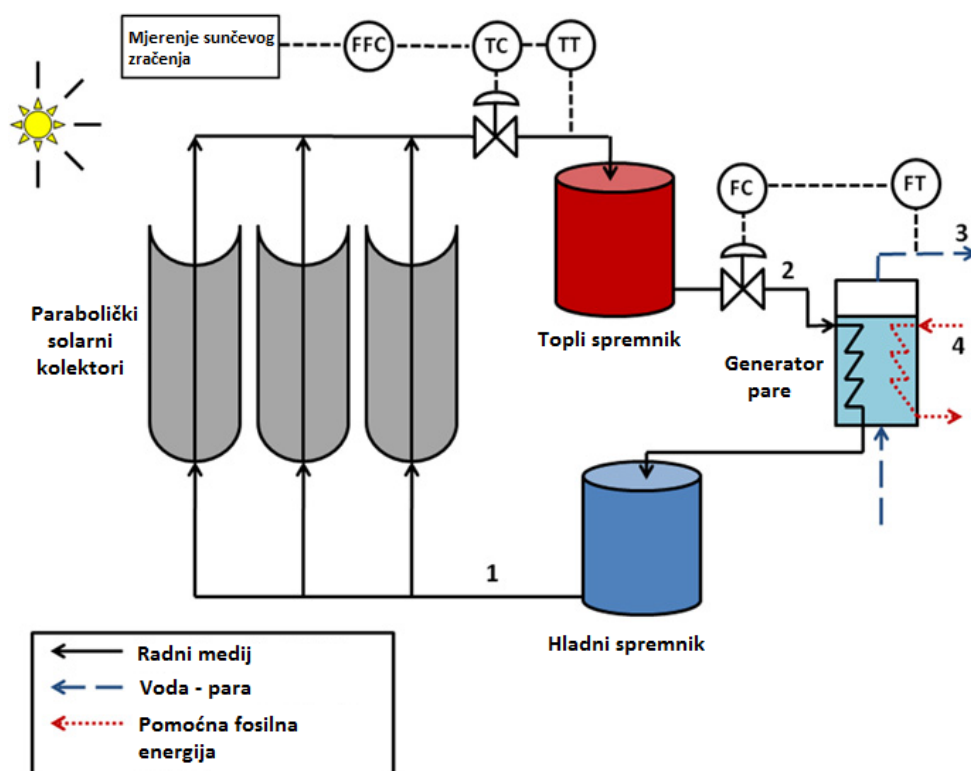
$$Q = \Delta T c_p \rho V \quad (3.1)$$

gdje je ΔT razlika između temperatura hladne i tople struje u kolektorskom polju, c_p specifični toplinski kapacitet radnog medija, ρ gustoća radnog medija i V volumen spremnika.

Kako postrojenje zahtijeva dva spremnika, potrebna je veća količina radnog medija u cijelom sustavu, kao i veći trošak materijala za izradu toplinskog spremnika. Prednost je što za izmjenu topline nije potreban izmjenjivač topline.

Tablica 1. Prikaz parametara različitih spremnika kapaciteta 15 MWh[13]

Radni medij	Gustoća [kg/m ³]	Specifični toplinski kapacitet [kJ/kg·K]	Masa medija [t]	Volumen spremnika [m ³]
Voda na tlaku od 75 bar-a	0.752	4.79	112.74	149.91
Suhozasićena para na 65 bar-a	0.032	7.41	72.875	2277.33
Therminol VP – 1	0.833	2.12	254.72	305.78
Delco therm Solar E15	2.65	2.65	203.77	315.93



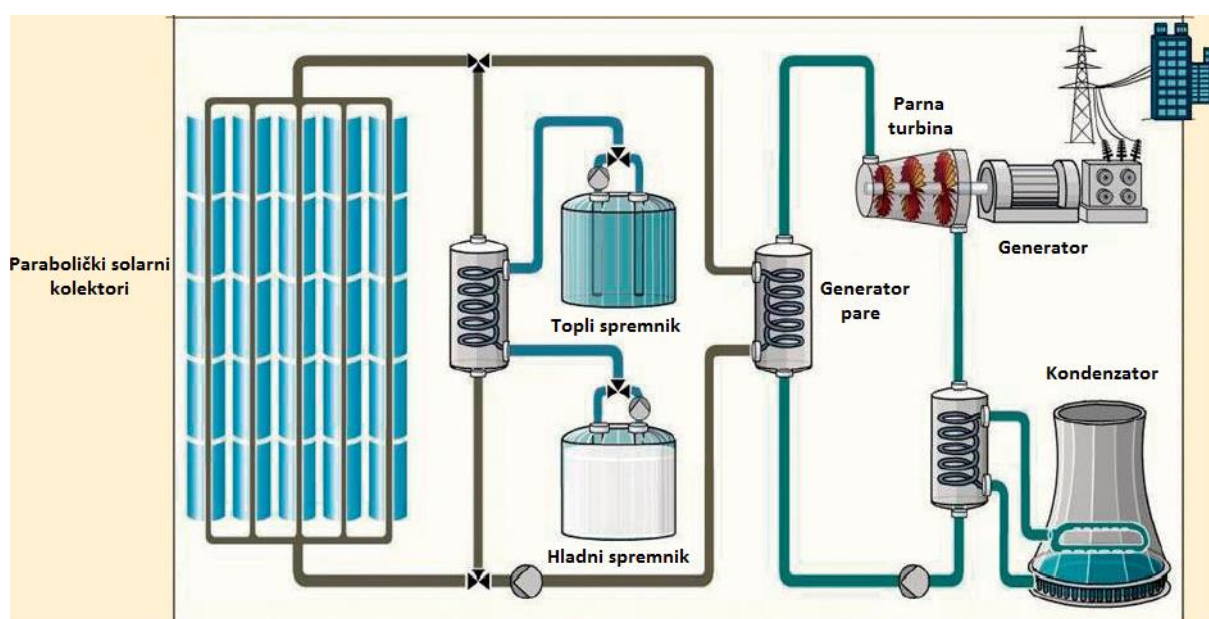
Slika 6. Prikaz postrojenja s direktnim osjetnim spremnikom topline[20]

3.2.2. Indirektni osjetni spremnik topline

Za razliku od direktnog pristupa, indirektni pristup se sastoji od primjene medija velike gustoće i specifičnog toplinskog kapaciteta kako bi se nadmašila barijera specifičnog toplinskog kapaciteta visokotemperaturnog radnog medija. Zbog toga, medij za skladištenje toplinske energije zasebni je krug na koji se toplota prenosi posredstvom izmjenjivača topline. Najčešće korišteni materijali za skladištenje topline nazivaju se toplinskim solima, te su to najčešće eutektičke mješavine istih. Problem može predstavljati kruto agregatno stanje mješavine soli na nižim temperaturama koje se mora izbjeći, odnosno mješavina mora biti u tekućem stanju cijelo vrijeme.[\[13\]](#),[\[14\]](#)

Tablica 2. Prikaz parametara različitih spremnika kapaciteta 15 MWh [\[13\]](#)

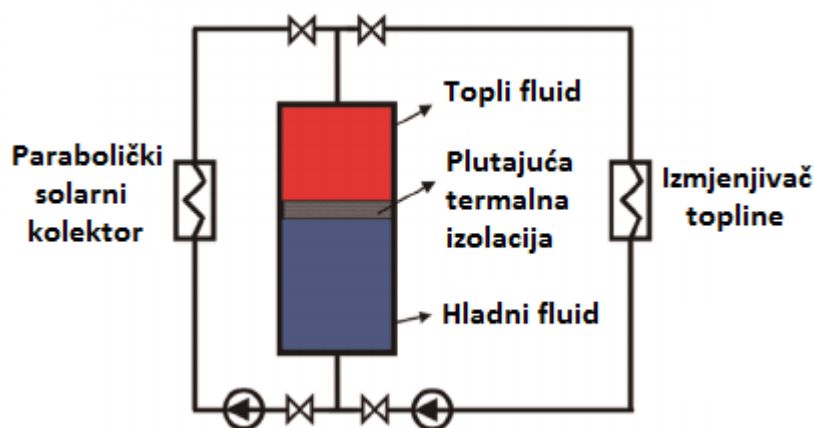
Smjesa soli	Temperatura taljenja [°C]	Gustoća [kg/m ³]	Specifični toplinski kapacitet [kJ/kg·K]	Masa soli [t]	Volumen spremnika [m ³]
Hitec XL (42% CaNO ₃ , 15% NaNO ₃ , 43% KNO ₃) u 59% vode	120	1.992	1.447	373.19	187.34
Hitec (7% NaNO ₃ , 53% KNO ₃ , 40% NaNO ₂)	142	1.67	1.621	333.13	199.48
Solarne soli (60% NaNO ₃ , 40% KNO ₃)	220	1.899	1.495	361.2	190.21



Slika 7. Prikaz postrojenja s indirektnim osjetnim toplinskim spremnikom [\[21\]](#)

3.2.3. Termoklinski osjetni toplinski spremnik

U ovakvom tipu toplinskog spremnika visokotemperaturni radni fluid je ujedno i medij za pohranu topline, a konstrukcija je takva da se prilikom punjenja spremnika hladni radni medij oduzima s dna spremnika, a zagrijani se dovodi na vrh gdje posredstvom razlike u gustoći ostaje na vrhu od kuda se dalje odvodi prema potrošačima kao zagrijana voda ili u našem primjeru, u generator pare za proizvodnju pare. Kako bi se spriječilo miješanje slojeva u spremniku, projektira se da brzina strujanja bude dovoljno niska da ne pobuđuje prisilno miješanje slojeva. Također se mogu postaviti pregrade koje sprječavaju miješanje ili postaviti termalnu izolaciju između sloja tople i hladne struje koja sprječava izmjenu topline. [17], [19]



Slika 8. Termoklinski osjetni spremnik s plutajućom pregradom [22]

Kao medij za pohranu, a time i radni fluid može biti voda sa svojim visokim specifičnim toplinskim kapacitetom, no ograničena je temperaturom isparavanja te se kao rješenje postavlja korištenje mješavine vode i glikola. Ako se želi postići veće temperature, kao radni medij može se koristiti visokotemperaturna ulja, no zbog potrebe za njenom velikom količinom (zbog malog toplinskog kapaciteta), koriste se u termoklinskim osjetnim toplinskim spremnicima s mješovitim medijima.

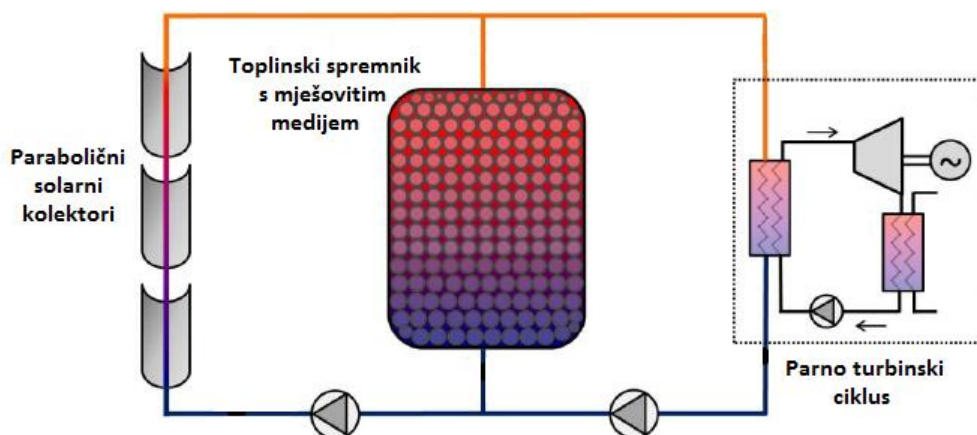
3.2.4. Termoklinski osjetni toplinski spremnik s mješovitim medijem

Termoklinski osjetni toplinski spremnici s mješovitim medijem koriste se od kraja devedesetih godina prošlog stoljeća kako bi se smanjila cijena skladištenja topline. Konstrukcija se sastoji od jednog spremnika u kojem se nalazi materijal za skladištenje, a materijal može biti kamen, šljunak ili pijesak. Visokotemperaturni radni fluid u direktnom je kontaktu s medijem i prolazi kroz pore, te na taj način izmjenjuje toplinu. Zbog takvog načina

izmjene topline nisu potrebna 2 spremnika, a niti izmjenjivač topline. Kapacitet skladištenja topline određen je svojstvima materijala za skladištenje topline te se biraju materijali s većim specifičnim toplinskim kapacitetom kako bi se smanjio volumen spremnika. Najčešće se kao radni mediji koriste visokotemperaturna ulja te je glavna prednost ovakve konstrukcije smanjena cijena u odnosu na spremnik s uljem. Zbog velike gustoće medija, spremnici imaju veliku masu, no volumenski ne zauzimaju puno prostora. Podaci u tablici određeni su na način da samo materijal skladišti 15MWh te se treba kompenzirati udio radnog medija koji se nalazi u spremniku tijekom izmjene topline. [13],[17],[24]

Tablica 3. Prikaz parametara različitih spremnika kapaciteta 15 MWh [13]

Materijal	Gustoća [kg/m ³]	Specifični toplinski kapacitet [kJ/kgK]	Masa materijala [t]	Volumen spremnika [m ³]
Granit	2.82	0.62	870.968	308.854
Bazalt	3.02	0.95	568.421	188.219
Kvarcit	2.57	0.84	642.857	250.139
Mramor	2.68	0.93	580.645	216.659
Hornfels	2.74	0.88	613.636	223.955



Slika 9. Termoklinski osjetni toplinski spremnik s mješovitim medijem [22]

3.3. Kemijski spremnici topline (sorpcijski)

Ovaj tip toplinskih spremnika može se podijeliti u dvije različite reakcije. Kako bi se potaknula endotermna reakcija potrebno je dovesti određeni iznos topline. [39] Energija za pokretanje endotermne kemijske reakcije dobiva se iz solarnog polja. Kako bi se potaknula reakcija otpuštanja topline potrebno je započeti katalitičku egzotermnu reakciju. Glavni uvjet

koji se postavlja na materijale je reverzibilnost procesa. Ove toplinske spremnike karakterizira velika gustoća skladištenja energije (300 kWh/m^3)

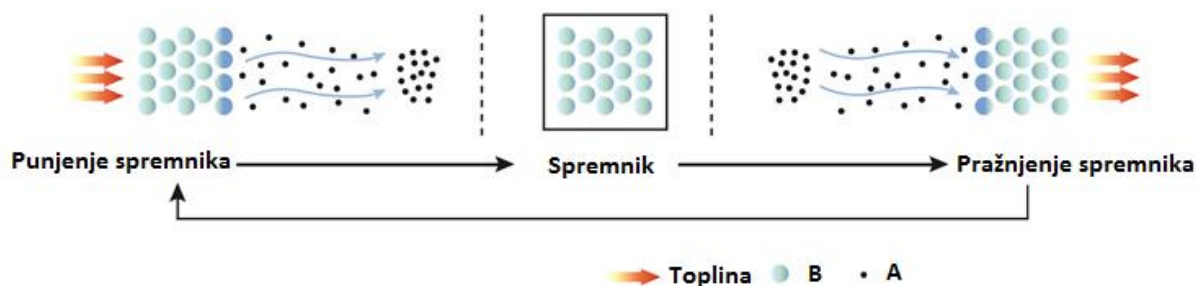
Značajnu primjenu mogu pronaći u centraliziranim sustavima za skladištenje otpadne topline iz industrijskih postrojenja, konvencionalnih elektrana, kombiniranim postrojenjima i u solarnim termoelektranama. Snaga im može varirati od nekoliko stotina kW do nekoliko MW. [14],[15],[23]

Iako zvučni kao dobro rješenje skladištenja toplinske energije, njihova primjena je još uvijek ograničena na istraživačke projekte te se ne primjenjuju u komercijalne svrhe. Na slici 10. može se primijetiti reakcija na temelju adsorpcije.

Tablica 4. Materijali za kemijsko skladištenje topline i njene kemijske reakcije[24]

Materijal	Radna temperatura [°C]	Promjena entalpije tijekom kemijske reakcije	Kemijska reakcija
željezov karbonat	180	2.6 GJ/m^3	$\text{FeCO}_3 \leftrightarrow \text{FeO} + \text{CO}_2$
metanol	200 – 250	-	$\text{CH}_3\text{OH} \leftrightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$
metalni hidrid	200 – 300	4 GJ/m^3	$\text{metal_xH}_2 \leftrightarrow \text{metal_yH}_2 + (x-y)\text{H}_2$
magnezijev oksid	250 – 400	3.3 GJ/m^3	$\text{MgO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Mg(OH)}_2$
amonijak	400 – 500	67 kJ/mol	$\text{NH}_3 + \Delta H \leftrightarrow 1/2\text{N}_2 + 3/2\text{H}_2$
kalcijev hidroksid	500	3 GJ/m^3	$\text{Ca(OH)}_2 \leftrightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
magnezijev oksid	530	42 kJ/mol	$\text{MnO}_2 \leftrightarrow 0,5\text{Mn}_2\text{O}_3 + 0,25 \text{ O}_2$
meta - voda	500 – 1000	-	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$
kalcijev karbonat	800 - 900	4.4 GJ/m^3	$\text{CaCO}_3 \leftrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

Kada se materijalu AB dodaje toplina on se disocira i razdvaja na svoje osnovne komponente A i B. Sve dok se dvije komponente ne dovedu u kemijsku reakciju, pohranjena toplina ne može se iskoristiti.



Slika 10. Shematski prikaz kemijske reakcije u toplinskom spremniku[23]

3.4. Latentni toplinski spremnici

Latentni spremnici topline rade na principu skladištenja topline u obliku energije promjene agregatnog stanja. Poznato je da materijal prilikom promjene agregatnog stanja, ima konstantnu temperaturu te se dovedena toplina troši na promjenu strukture materijala. Sam proces je reverzibilan te za svoje odvijanje zahtijeva dovođenje, odnosno odvođenje topline. Specifična topline promjene agregatnog stanja može se odrediti kao razlika specifične entalpije medija nakon potpune pretvorbe agregatnog stanja i stanja kada promjena agregatnog stanja započinje. Pri konstantnom tlaku iznos specifične topline promjene agregatnog stanja može se zapisati kao:

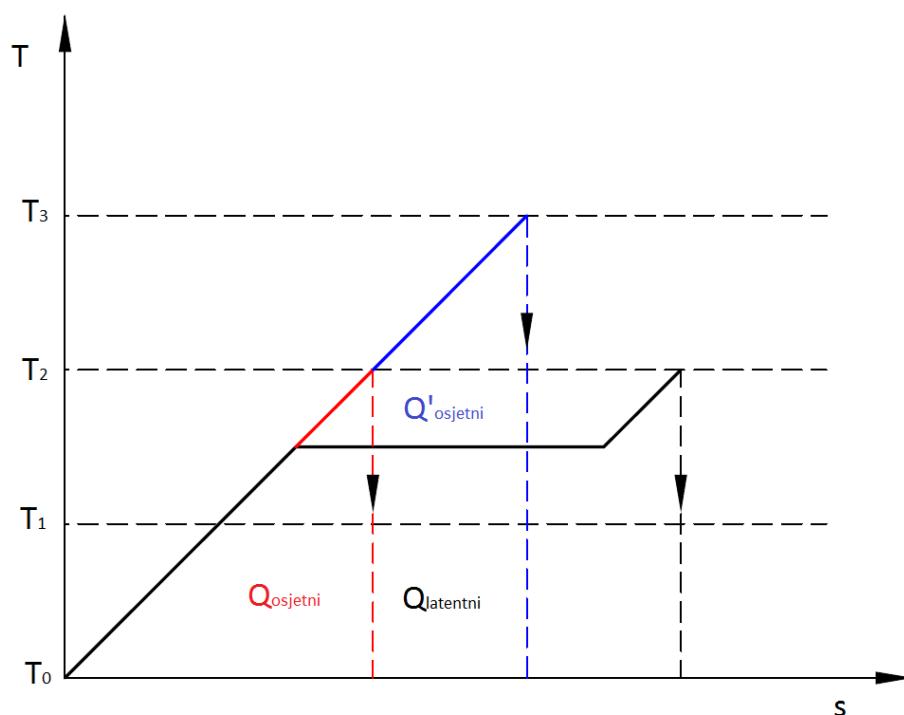
$$r = Q_1 + Q_2 \quad (3.2)$$

gdje Q_1 predstavlja iznos topline koji se troši na promjenu unutarnje energije odnosno na razbijanje međumolekularnih veza. Iznos specifične topline Q_2 predstavlja toplinu koja se troši za izvršeni rad promjene volumena medija. Iznos topline koja se troši za promjenu agregatnog stanja je znatno veća od iznosa koji se troši na rad pri povećanju volumena. Može se usporediti potreban iznos topline isparavanja vode. Iznos potreban za promjenu unutarnje energije i preraspodjelu vodikovih veza iznosi $Q_1 = 2075.41$ kJ/kg dok iznos energije potreban za nadomještanje promjene volumena iznosi $Q_2 = 169.56$ kJ/kg. [\[24\]](#), [\[41\]](#)

Primjena je takva da se najčešće koristi promjena agregatnog stanja iz krutine u tekućinu jer je promjena volumena mala te je prirast tlaka zanemariv. Ako se koristi materijal s promjenom agregatnog stanja u plinovito potrebno je osigurati konstrukciju uslijed mogućnosti pojave viših tlakova. Prednost latentnih spremnika je mogućnost izmjene topline s konstantnom temperaturom u spremniku te manja razlika temperatura tople i hladne struje te time i veća gustoća pohrane energije naspram osjetnih spremnika. [\[13\]](#) Nedostatak spremnika je niska toplinska provodnost odnosno spora izmjena topline prilikom punjenja i pražnjenja spremnika. Kada je medij u kapljevitoj fazi, transport topline je zadovoljavajući i temelji se na slobodnoj konvekciji, no problem stvara prijenos topline kada je materijal u krutom stanju te je glavni model prijenosa topline kondukcija kroz sloj medija za pohranu. Kako bi se riješio taj problem koriste se različite konstrukcije cjevovoda kao namjera povećanja površine izmjene topline, te se istražuju kompozitni materijali koji sadrže ugljik koji povećava ukupnu toplinsku provodnost medija. [\[26\]](#) Kako je ideja latentnih spremnika još u fazi istraživanja te nema komercijalne upotrebe, svojim svojstvima, prvenstveno većom gustoćom

pohrane energije, ima svjetlu budućnost u primjeni kao materijal za pohranu toplinske energije.

Prednost materijala s faznom pretvorbom naspram materijala korištenih u osjetnim spremnicima je značajno veća mogućnost skladištenja energije za istu temperaturnu razliku. Tu prednost im daje konstantna temperatura prilikom fazne pretvorbe te je konačni izvor skladištene energije materijala s faznom pretvorbom jednak zbroju osjetne specifične topline krutine, latentne topline pretvorbe agregatnog stanja i osjetne topline materijala u kapljevitom stanju. Za istu temperaturnu razliku, materijal za osjetne spremnike sadrži jedino osjetnu toplinu proporcionalnu temperaturnoj razlici.



Slika 11. Usporedni prikaz količine skladištene energije u T,s dijagramu za latentni i osjetni spremnik s jednakim specifičnim toplinskim kapacitetima

Na slici je sa $Q_{osjetni}$ označena količina energije koja se može dobiti iz osjetnog toplinskog spremnika za temperaturnu razliku $\Delta T_1 = T_2 - T_0$ (površina ispod crvene linije). Sa $Q_{latentni}$ označena je energija koja se može za istu temperaturnu razliku ΔT_1 uskladištiti u latentnom spremniku (površina ispod crne linije). Usporedbom površina može se zaključiti o prednosti latentnog spremnika u okviru skladištenja energije. $Q'_{osjetni}$ označuje energiju koja je jednaka energiji $Q_{latentni}$, no uz veću temperaturnu razliku $\Delta T_2 = T_3 - T_0$ (površina ispod plave linije)

Razni materijali mogu se koristiti kao materijal za skladištenje energije te se mogu podijeliti u anorganske, organske materijale te eutektičke mješavine. Organski materijali najčešće imaju parafinsku bazu, a temperatura taljenja ovisi o mješavini materijala. Prednosti organskih materijala su:

- Široki raspon temperatura taljenja
- Ne toksičnost
- Nisu korozivni
- Nisu higroskopni
- Kemijska stabilnost
- Visoki iznos latentne topline

Nedostaci organskih materijala su:

- Visoka cijena
- Mala gustoća
- Mala toplinska provodnost
- Zapaljivost
- Niske temperature promjene faze

Kao anorganski spojevi pojavljuju se razne soli. Prednosti anorganskih materijala su:

- Manja cijena
- Visok iznos latentne topline
- Široki raspon temperatura taljenja
- Visoka specifična gustoća

Nedostaci anorganskih medija:

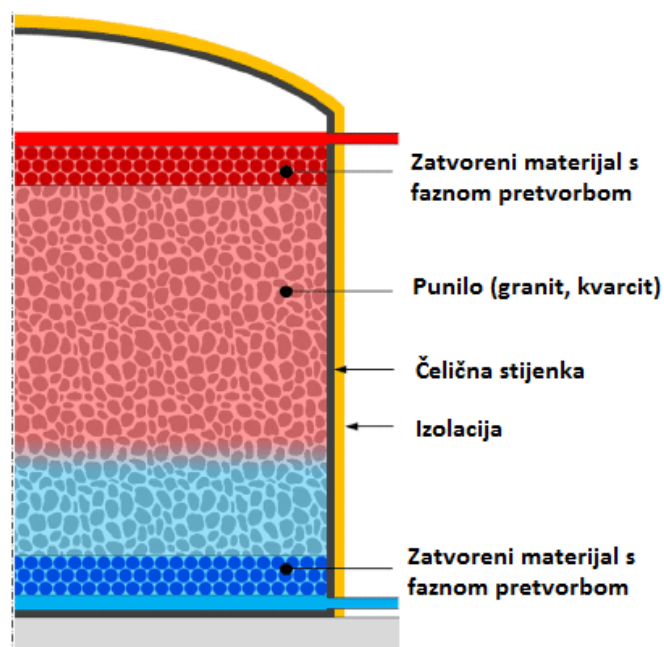
- Potrebno je zatvaranje u kapsule ako sadrže vodu, kako bi spriječili gubitak vode tijekom ciklusa izmjene topline (ako se radi o hidratima soli)
- Dugoročna kemijska odnosno temperaturna stabilnost
- Problem korozije u kontaktu sa spremnikom i izmjenjivačima topline
- Visoke cijene

Eutektičke mješavine, najčešće mješavine nekoliko vrsta soli, istražuju se kako bi se postigla određena temperatura taljenja, dobra toplinska provodnost na nižim temperaturama te kako bi se produžio vijek trajanja i temperaturna stabilnost mješavina.[\[16\]](#)

Tablica 5. Materijali latentnih spremnika topline[\[24\]](#)

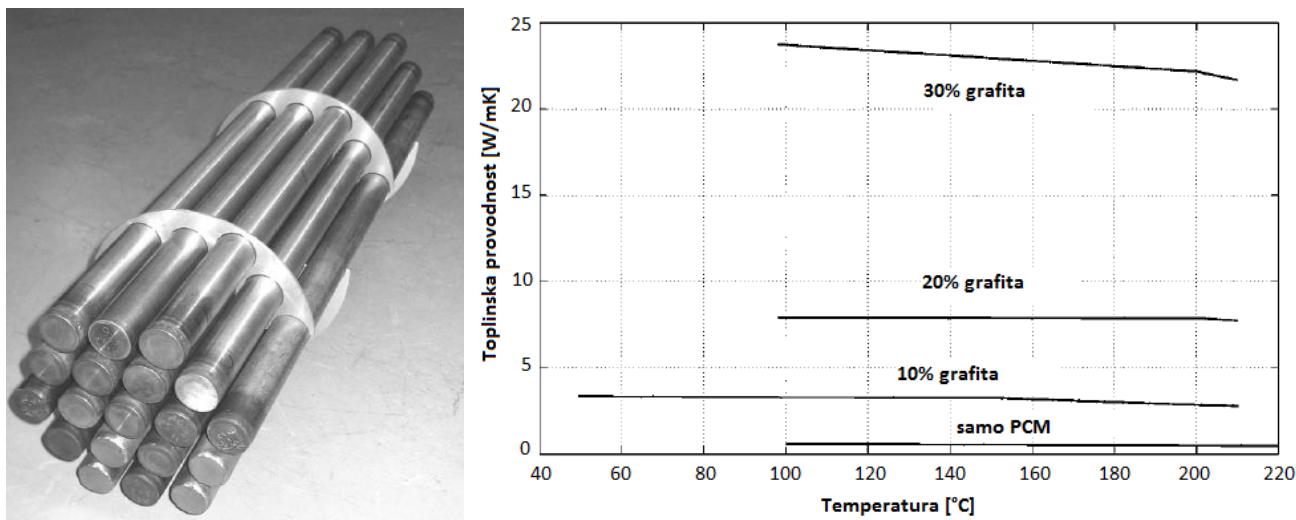
Materijal	Temperatura pretvorbe [°C]	Gustoća [kg/m ³]	Toplinska provodnost [W/mK]	Latentna toplina [kJ/kg]
E117	117	1450	0.7	167
68% KCl + 32% ZnCl ₂	235	2480	-	198
NaNO ₂	271	2168	1	212
NaNO ₃	307	2260	0.5	172
NaOH	318	2130	-	158
KNO ₃	333	2110	0.5	226
KOH	380	2044	0.5	149.7
45,5% MgCl ₂ – 21,6% KCl – 33% NaCl	380	2044	0.5	149.7
sol – keramika NaCO ₃ – BaCO ₃ /MgO	500 - 850	2600	5	415.4

Kao moguće rješenje smanjenja cijene latentnih toplinskih spremnika, pojavljuje se tzv. kruti višeslojni materijal s faznom promjenom (*MLSPCM*). Svojstva su mu takva da ima 74% kapacitet skladištenja energije i 32% korištenog materijala za pohranu uspoređujući ga sa sustavom sa dva spremnika. Rješenje se sastoji od ukomponirane dvije vrste spremnika topline kako bi se smanjila ukupna cijena spremnika. Koristi se materijal s faznom pretvorbom koji povećava iskoristivost spremnika i smanjuje njegov volumen, te termoklinski kako bi smanjio ukupnu cijenu, koristeći jeftine materijale kao što su to kvarcit i granit. Konstrukcija je takva da se termoklinski materijal nalazi između dva sloja materijala s faznom pretvorbom te tako popunjava prostor i razdvaja materijale s faznom pretvorbom, a sve je ukomponirano u jednom spremniku. Dosadašnja istraživanja pokazuju kako ovaj koncept smanjuje degradaciju termoklina, poboljšava akumulacijska svojstva cijelog sustava te osigurava stabilniju temperaturu pražnjenja spremnika.[\[18\]](#)



Slika 12. Kruti višeslojni materijal sa faznom promjenom (MLSPCM)[\[25\]](#)

Za rješavanje problema male toplinske provodnosti postavlja se nekoliko mogućih konstrukcijskih rješenja. Mogućnost promjene površine izmjene topline na način da se PCM zatvori u kapsule ili postavljanje orebrenja na cijevi. Kao orebrenja, pokazalo se da je najbolje koristiti grafit jer ima tri puta bolju toplinsku provodnost od čelika, a i otporan je na koroziju kada je izložen nitratnim solima. Drugo rješenje povećanja površine je zatvaranje materijala fazne pretvorbe u kapsule napravljene od materijala s velikom toplinskom provodnošću. Kako tijekom fazne pretvorbe dolazi do promjene volumena medija, potrebno je osigurati konstrukciju kapsule protiv pucanja te postoje dva konstrukcijska rješenja. Jedno je korištenje tvrde kapsule s plinom dok drugo predstavlja korištenje rastezljivog materijala kapsule. Kao druga metoda rješavanja problema niske toplinske provodnosti predstavlja se kreiranje kompozita grafita i materijala fazne pretvorbe, čime se dobiva homogeni proizvod s izotropnim svojstvima i povećanom toplinskom provodnošću.[\[26\]](#)



Slika 13. Mjere povećanja toplinske provodnosti. Postavljanje fazno promjenjivog materijala u kapsule (lijevo). Stvaranje kompozita materijala s faznom pretvorbom i grafita (desno)[\[26\]](#)

3.5. Primjena toplinskih spremnika u solarnim termoelektranama

Kako se tehnologija skladištenja topline razvijala, sve se više postrojenja počelo graditi s primjenama toplinskih spremnika.

Prvo su u primjeni bili korišteni spremnici s direktnim skladištenjem topline odnosno materijal za pohranu bio je isti onaj medij koji je služio za prijenos topline od kolektora do generatora pare. Višak visokotemperaturnog radnog medija skladištio se u topli spremnik te se akumulirao za vrijeme većeg iznosa topline dobivenog od sunca nego što generator pare zahtijeva. Kasnije, kada sunce zađe ili kada oblaci onemogućuju direktnom zračenju sunca da doprije do kolektora, skladišten visokotemperaturni medij iz spremnika topline šalje se u generator pare i proizvodnja se nastavlja. Korištenjem medija iz toplinskog spremnika, zahtijeva postojanje još jednog spremnika gdje se skladišti višak ohlađenog medija nakon što izađe iz generatora pare. Primjena direktnog pristupa toplinskih spremnika ostvarena je još 1983. godine izgradnjom "Solar Electric Generating Station I" u Kaliforniji koji je kao medij za pohranu koristio mineralno ulje. Također je i 1995. godine u Kaliforniji primijenjena metoda direktnog osjetnog spremnika na solarnom tornju tzv. Solar Two gdje je medij za skladištenje energije, ujedno i radni medij, bila rastaljena sol. Prednost takvog tipa je što ne zahtijeva izmjenjivač topline, a kako je pristup direktan, te zagrijani medij direktno odlazi u generator pare, ne karakterizira ga loše svojstvo osjetnih toplinskih spremnika da prilikom pražnjenja opada temperatura u spremniku.

Danas su najzastupljeniji spremnici topline s indirektnom pohranom energije odnosno medij za pohranu topline nije više i radni medij, već se koristi medij s boljim specifičnim toplinskim kapacitetom i posredstvom izmjenjivača topline prenosi toplinu na radni medij koji u generatoru pare proizvodi paru za pogon parne turbine. Iako skuplji zbog potrebe za izmjenjivačem topline, pokazuju se kao bolje rješenje. Najčešće se kao medij za pohranu koriste eutektičke mješavine soli (NaNO_3 i KNO_3). Mnoge solarne termoelektre izgrađene u Španjolskoj koriste ovaj princip kao i solarni tornjevi tvrtke SolarReserve. Solarna termoelektrana "Solana Generating Station" u Arizoni koristi toplinski spremnik s indirektnom metodom skladištenja, a kao medij za pohranu topline koristi rastaljene soli koji joj omogućuju produljenje rada za 6h. [\[27\]](#), [\[28\]](#)

U manjim postrojenjima kao toplinski spremnici koriste se termoklinski spremnici s mješovitim medijem, najčešće granitom i kvarcitom, jer je cijena materijala relativno niska.

U novije vrijeme sve više pažnje u znanstveno-istraživačkim krugovima posvećuje se latentnim i kemijskim toplinskim spremnicima. Oba tipa karakterizira prednost u većoj gustoći pohrane energije. Latentni spremnici se istražuju duže vrijeme, a postoji i niz ispitnih postrojenja ostvarenih kroz razne pilot projekte. Istražuju se i razne mješavine soli kako bi se postigla mala toplinska provodnost koja karakterizira latentne spremnike topline. Dio istraživanja usmjeren je i na razvoj kompozita za povećanje toplinske provodnosti. Kemijski toplinski spremnici, još se u ranoj fazi istraživanja, a kao prednost imaju najveću gustoću skladištenja topline. Postoje problemi intermitencije sunčeve energije koji ne pogoduju kemijskim toplinskim spremnicima, te se moraju razriješiti kako bi njihova primjena bila komercijalizirana. [\[15\]](#)

Trenutno je u izgradnji solarna termoelektrana zvana "Noor Power Station" u Maroku. U pogodu je "Noor 1" snage 160 MW s toplinskim spremnikom za produljenje rada od 3 sata. Kao radni medij i medij za skladištenje energije koristi rastaljenu sol. U planu je puštanje u rad pogona "Noor 2" snage 200 MW s toplinskim spremnikom za produljenje rada do 7 sati te bi trebala započeti s radom do kraja 2017. godine. Za razliku od "Noor 1" i "Noor 2", "Noor 3" koji bi trebao započeti proizvoditi električnu energiju 2018. godine, konstrukcije je solarnog tornja, a ne paraboličnih zrcala te je predviđena snaga postrojenja od 150 MW s toplinskim spremnikom za produljenje rada od 8 sati. [\[29\]](#)



Slika 14. Prikaz gradnje toplinskog spremnika "Noor 1" postrojenja od 160 MW [\[30\]](#)

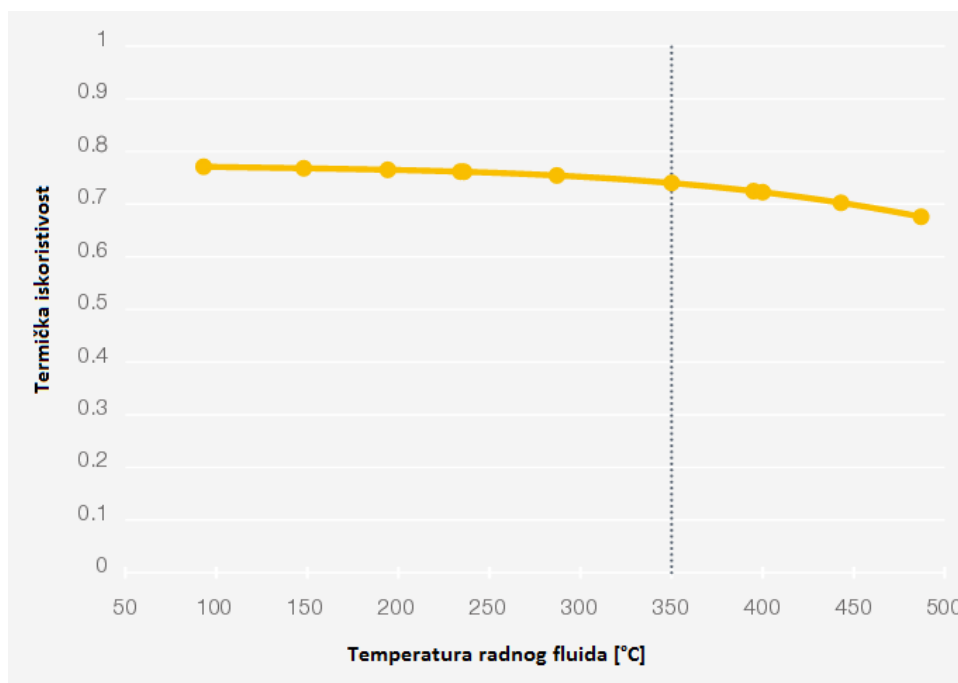
4. DIMENZIONIRANJE LATENTNOG SPREMNIKA TOPLINE

U ovom radu latentni spremnik topline dimenzioniran je za trosatno produljenje rada elektrane nakon njenog stacionarnog rada temeljem topline dobivene direktno iz solarnih kolektora. Solarna termoelektrana snage je 1 MW električne energije, stoga je potrebno odrediti koliko je toplinskog toka u potrebno za dobivanje električne energije snage 1 MW. Kako odgovor na to pitanje zahtijeva detaljnu analizu rada sustava termoelektrane, podaci su preuzeti iz rada [31]. Iz rada [31] za rad elektrane snage 1 MWe potrebno je 5,387 MW toplinske energije. Udio energije sunca koji će se skladištiti u toplinski spremnik, a time i predstavlja vrijednost za dimenzioniranje sustava, je višak energije koji se dobiva tijekom najvećeg sunčevog zračenja kada je maseni protok radnog fluida tražene temperature jednak stacionarnom masenom protoku za rad generatora pare na konstantnoj snazi. Kako se maseni protok radnog fluida u kolektorskom polju mijenja kako bi se održala konstantna temperatura na izlazu iz kolektorskog polja, maseni protok je nakon postizanja vrijednosti masenog protoka za stacionarni rad generatora veći od potrebnoga te se upravo taj višak protoka koristi za skladištenje topline u toplinskom spremniku. Definiranjem radnih temperatura, odnosno temperatura na ulazu i izlazu iz kolektorskog polja, može se odrediti dobiveni maseni protok u kolektorskom polju. Izlazna temperatura radnog medija iz kolektorskog polja, a time i na ulazu u generator pare i toplinski spremnik je 330 °C. Temperatura ulaza radnog medija u kolektorsko polje jednaka je temperaturi na izlazu iz generatora pare, a također je jednaka i temperaturi na ulazu u toplinski spremnik prilikom njegovog pražnjenja te je jednaka 200 °C. Radni fluid je trgovačkog naziva XCEL THERM®LV. Svojstva radnog fluida mogu se vidjeti u tablici niže.

Tablica 6. Svojstva radnog fluida[32]

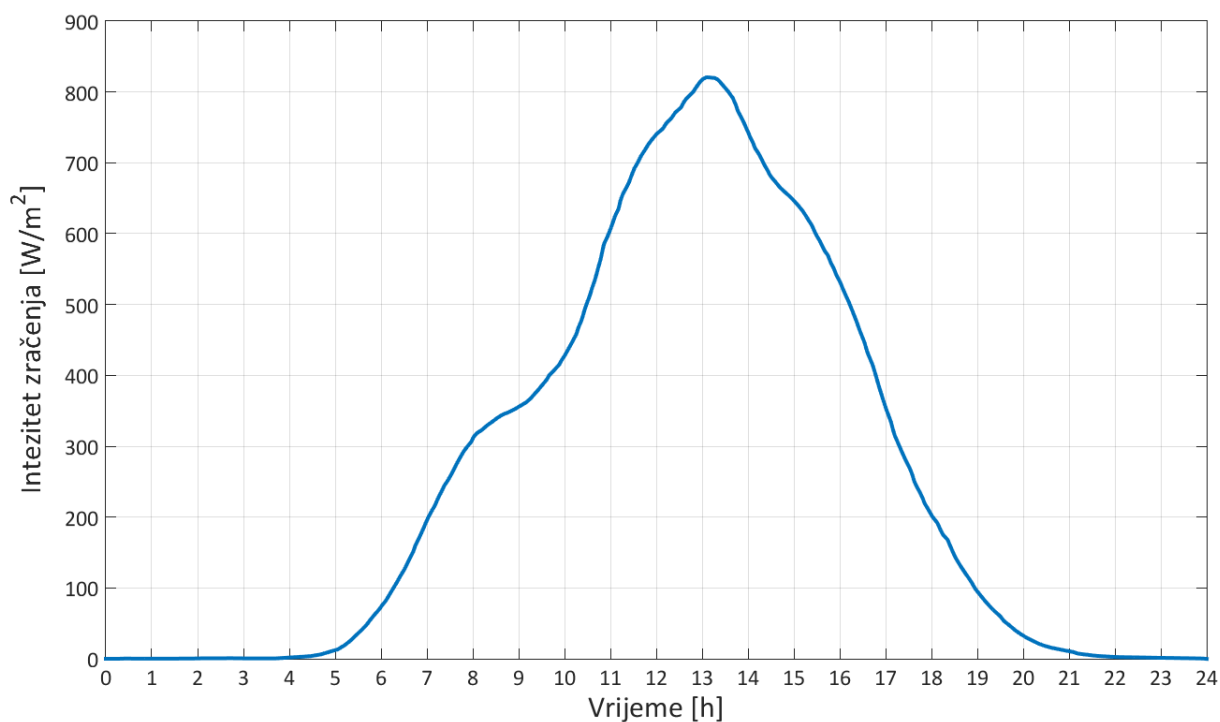
XCEL THERM®LV	
Maksimalna temperatura	400 °C
Temperatura kristalizacije	7.2 °C
Gustoća*	870 kg/m ³
Specifični toplinski kapacitet*	2275 J/kgK
* na temelju radne temperature	

Odabrani su parabolični kolektori tvrtke SkyFuel. [33] SkyTrough kolektori sastoje se od ogledala površine 750 m². Maksimalna radna temperatura je 500 °C, a iskoristivost se kreće između 70 i 80%. Kasnije će se odrediti potrebni broj sklopova kolektora kako bi se ostvarilo produljenje rada termoelektrane za 3 sata.



Slika 15. Termička iskoristivost paraboličkih kolektora [33]

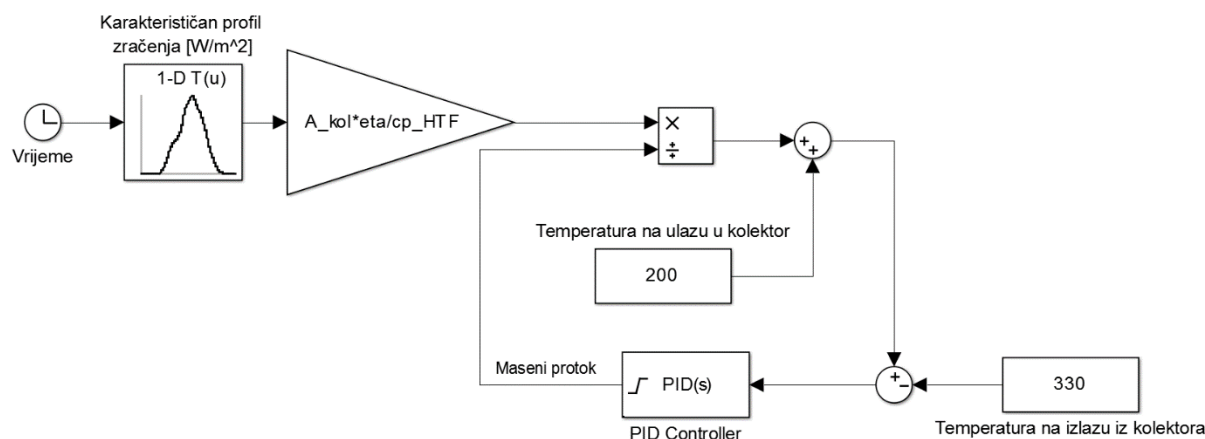
Kako bi se moglo provesti dimenzioniranje, potrebno je poznavati toplinski tok koji predaje sunce tijekom dana tj. potrebno je poznavati profil zračenja sunca na određenoj lokaciji. Za CSP tehnologiju ključno je direktno sunčevo zračenje te je profil zračenja za odabranu lokaciju preuzet iz [24]. Pretpostavlja se da je takav profil karakterističan za uvijete rada same termoelektrane.



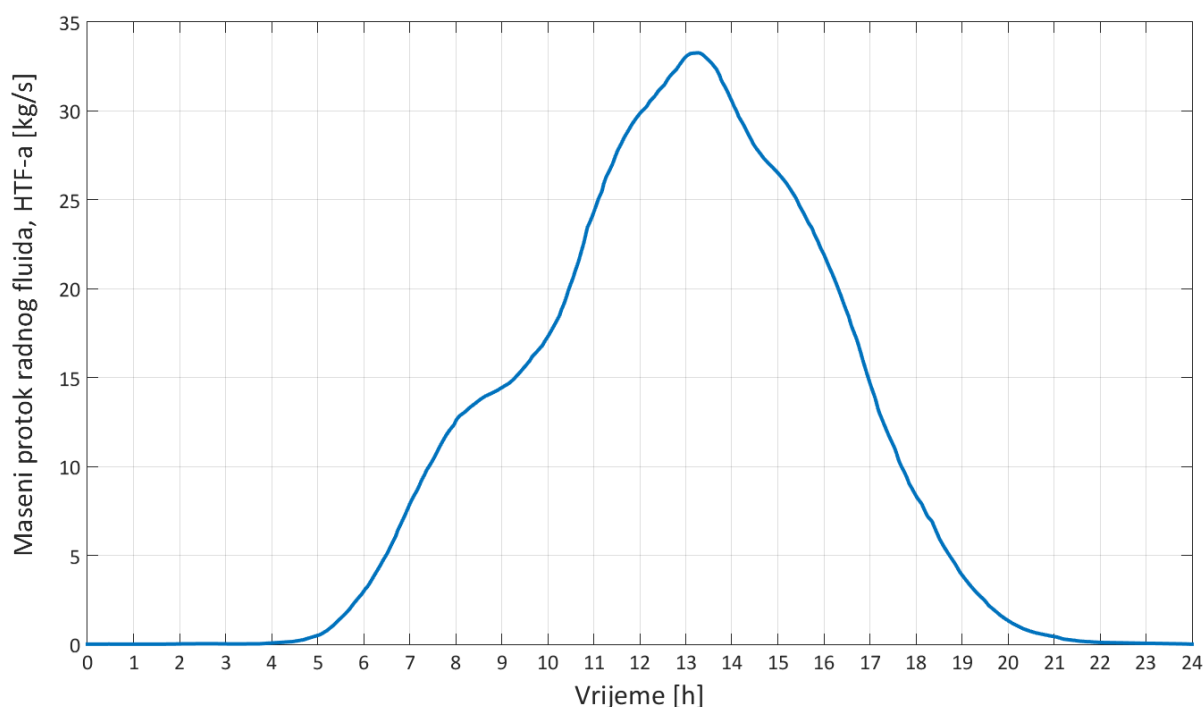
Slika 16. Karakteristični profil zračenja sunca[\[31\]](#)

Na temelju poznatog profila zračenja može se odrediti potreban broj kolektorskih polja kako bi se osiguralo minimalno trosatno produljenje rada termoelektrane. Korištenjem računalnog programa Matlab izračunato je kako je za rad elektrane s trosatnim produljenjem potrebno instalirati 22 sustava solarnih kolektora od kojih svaki ima površinu od 750 m². Pretpostavlja se da je sva toplina prenesena tijekom vremena punjenja spremnika te se ne uzima u obzir tromost sustava, odnosno utjecaj manje toplinske provodnosti materijala pohrane toplinske energije. Kasnije će se na temelju rezultata simulacije toplinskih spremnika pokazati može li se ostvariti trosatno produljenje rada ako se u obzir uzmu određeni mehanizmi izmjene topline.

Poznatim profilom zračenja, površinom kolektorskog polja i njegovom termičkom iskoristivošću, te zadanim ulaznim i izlaznim temperaturama može se pronaći potrebni maseni protok radnog fluida kako bi se održala tražena razlika temperatura. Maseni protok radnog fluida, termičkog ulja XCEL THERM®LV, dobiven je zatvaranjem povratne veze u Simulink modelu, gdje se na temelju izlazne temperature vrši promjena masenog protoka.



Slika 17. Prikaz modela dobivanja potrebnog masenog protoka HTF-a



Slika 18. Maseni protok radnog fluida za održavanje konstantne temperature na izlazu iz kolektora

Može se primijetiti kako je krivulja istog oblika kao i krivulja karakterističnog direktnog zračenja jer krivulja karakterističnog zračenja predstavlja jedinu promjenu u sustavu (specifični toplinski kapacitet radnog fluida uzet je kao konstantan), tj logično je da se maseni protok mijenja po jednakom obliku krivulje kao što je to krivulja karakterističnog direktnog zračenja sunca.

Potreban maseni protok radnog fluida za rad generatora pare pri nazivnoj snazi može se pronaći na temelju poznate toplinske energije, te na temelju poznatih temperatura ulaza i izlaza radnog fluida iz generatora pare.

$$\dot{m}_{GP} = \frac{\Phi_{GP}}{c_{HTF}(\vartheta_u - \vartheta_{iz})} \quad (4.1)$$

gdje je :

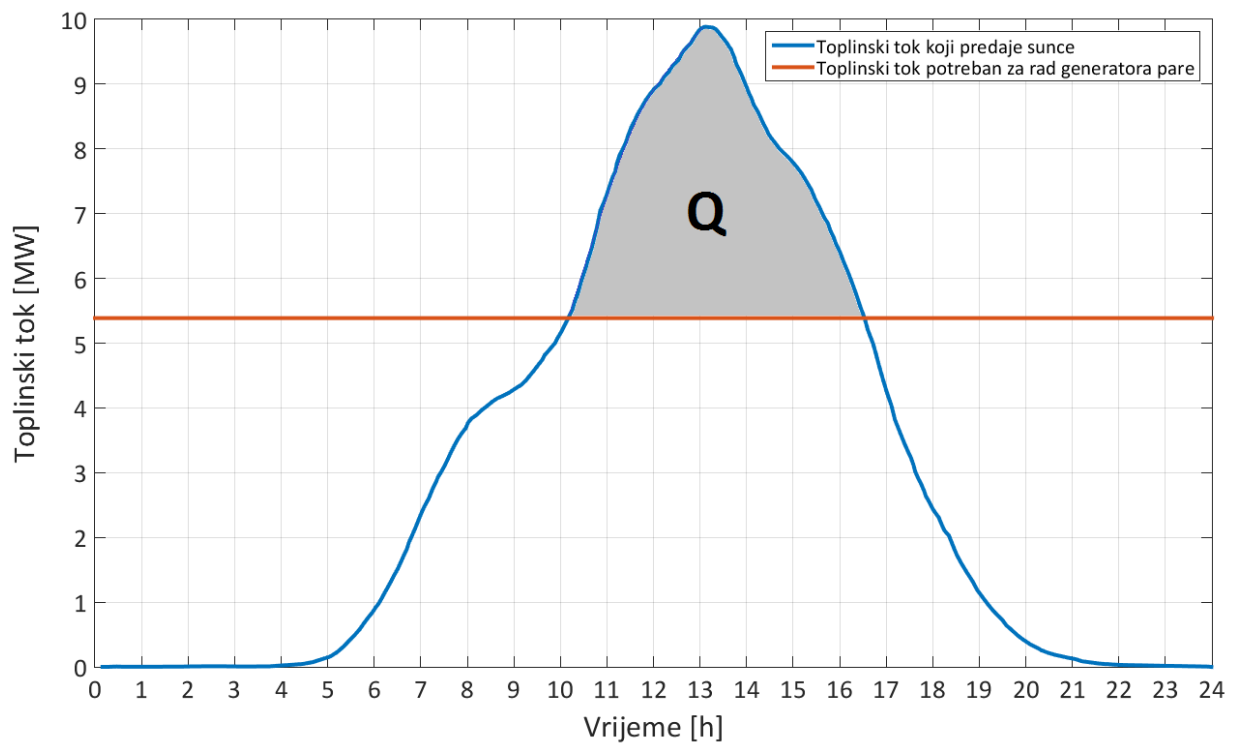
- Φ_{GP} toplinski tok potreban za generator pare (5.387 MWt)
- c_{HTF} specifični toplinski kapacitet radnog fluida (XCELTHERM®LV)
- ϑ_u i ϑ_{iz} su temperature radnog fluida na ulazu i izlazu iz generatora pare

Potrebno je odabrati materijal fazne pretvorbe (PCM) koji promjenu faze ima unutar radnog temperaturnog područja. Kao materijal sa faznom pretvorbom odabrana je natrijeva sol dušične kiseline ili natrijev nitrat (NaNO_3). Materijal je odabran na temelju njegove temperature fazne pretvorbe (306 °C) što je pogodno za temperaturnu razliku rada termoelektrane. Svojstva natrijevog nitrata mogu se vidjeti niže u tablici. [\[34\]](#)

Tablica 7. Svojstva materijala fazne pretvorbe [\[34\]](#)

Natrijev nitrat (NaNO_3)	
Temperatura fazne pretvorbe	306 °C
Gustoća	2100 kg/m ³
Toplinska provodnost	0.75 W/mK
Latentna toplina	172 kJ/kg
Specifični toplinski kapacitet krute faze	1500 J/kgK
Specifični toplinski kapacitet tekuće faze	1650 J/kgK

Udio toplinske energije koji se koristi za dimenzioniranje toplinskog spremnika je višak energije koje sunce predaje kolektorima, a generator pare sa svojom konstantnom snagom ne može iskoristiti. Taj iznos toplinske energije predstavlja površina na slici 19.



Slika 19. Prikaz toplinskog toka kojeg predaje sunce i koji je potreban za rad generatora pare uz prikaz energije koja se koristi za dimenzioniranje toplinskog spremnika

Toplinska energija računa se na temelju oduzimanja površina koje zatvaraju krivulje dnevnog toplinskog toka koje predaje sunce i toplinskog toka za rad generatora pare. To se može prikazati formulom:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} (\Phi_{sol} - \Phi_{GP}) \cdot dt \quad (4.2)$$

gdje je:

- t_1 trenutak kada su solarni dobici veći od zahtjeva generatora pare
- t_2 trenutak kada solarni dobici više nisu dovoljni za rad generatora pare
- Φ_{sol} toplinski tok koji predaje sunce
- Φ_{GP} toplinski tok koji je potreban za rad generatora pare

Poznavanjem energije koja se skladišti u toplinski spremnik (Q), uz poznate radne temperature, latentnu toplinu materijala s faznom pretvorbom, temperaturu taljenja

materijala s faznom pretvorbom te njihovim specifičnim toplinskim kapacitetima, može se izračunati masa materijala s faznom pretvorbom (PCM).

$$M_{PCM} = \frac{Q}{c_{p,k} \cdot (\vartheta_t - \vartheta_u) + r + c_{pt}(\vartheta_{iz} - \vartheta_t)} \quad (4.3)$$

gdje je:

- c_{pk} specifični toplinski kapacitet krute faze PCM–a
- c_{pt} specifični toplinski kapacitet tekuće faze PCM–a
- ϑ_t temperatura taljenja PCM – a (306 °C)
- ϑ_u najniža temperatura PCM – a (200 °C)
- ϑ_{iz} najviša temperatura PCM – a (330 °C)
- r latentna toplota PCM – a prilikom fazne pretvorbe

Izmjena topline između radnog fluida i PCM – a izvodi se na principu Shell and Tube izmjenjivača s jednim prolazom struje radnog fluida. Kroz cijevi struji radni fluid, a van njih se nalazi materijal s faznom pretvorbom. Tako je i sam spremnik izveden kao izmjenjivač topline. Volumen materijala fazne pretvorbe može se izraziti preko izraza:

$$V_{PCM} = \frac{d_{PCM}^2 - d_{s,v}^2}{4} \cdot \pi \cdot L \cdot N \quad (4.4)$$

gdje je:

- d_{PCM} promjer materijala fazne pretvorbe oko cijevi
- $d_{s,v}$ promjer vanjske stijenke cijevi (radnog fluida)
- L duljina cijevi u spremniku topline
- N broj cijevi u spremniku topline

Zbog sličnosti paralelnih cijevi, kasniji proračun vršit će se za jednu referentnu cijev oko koje će se nalaziti materijal fazne pretvorbe

Uz poznatu gustoću materijala fazne pretvorbe može se pronaći volumen materijala fazne pretvorbe te iz izraza (4.4) pronaći umnožak duljine i broja cijevi u toplinskom spremniku.

$$L \cdot N = \frac{4 \cdot M_{PCM}}{\rho_{PCM} \cdot \pi \cdot (d_{PCM}^2 - d_{s,v}^2)} \quad (4.5)$$

Pretpostavka je da je materijal fazne pretvorbe u obliku kružnog vijenca te time postoji određeni volumen u spremniku topline koji nije popunjen materijalom fazne pretvorbe. Može se pretpostaviti da je taj volumen dovoljan za razliku u volumenu materijala prilikom fazne pretvorbe. U gornjem izrazu potrebno je pretpostaviti jednu veličinu, te je fizikalnije pretpostaviti samu duljinu cijevi. Pretpostavlja se duljina cijevi od 15 m te se time može doći do konačnog broja cijevi.

Kod dimenzioniranja, iznos topline koji se dobiva u kolektorima i nakon trenutka t_2 (iz 4.2) ne uzima se u obzir jer njegov iznos ovisi o sunčevom zračenju u određenom vremenskom trenutku te se ne može uzeti sa sigurnošću da će svakoga dana u trenutku t_2 biti dovoljno topline, koja će u zbroju s viškom od trenutka t_1 (iz 4.2) do t_2 , biti dovoljan za trosatno produljenje rada. Kasnije, u modelu rada toplinskog spremnika, dio toplinske energije iz kolektorskog polja nakon trenutka t_2 , koristiti će se zajedno sa toplinskom energijom iz toplinskog spremnika kako bi se ostvarili zahtjevi za generator pare. Udio toplinske energije koje predaje sunce prije trenutka t_1 se također ne uzima u obzir prilikom dimenzioniranja zbog istog razloga kao i udio toplinske energije nakon trenutka t_2 , te se pretpostavlja da se taj iznos topline koristi za progrijavanje cijevi i ulja na potrebnu radnu temperaturu u trenutku t_2 .

Tablica 8. Rezultati dimenzioniranja spremnika

Dimenzioniranje latentnog toplinskog spremnika	
Masa materijala fazne pretvorbe	162.6 t
Volumen materijala fazne pretvorbe	77.4 m ³
Visina toplinskog spremnika	15 m
Promjer materijala fazne pretvorbe	300 mm
Debljina materijala fazne pretvorbe	70 mm
Promjer spremnika topline	3 m
Broj cijevi	102

5. DIMENZIONIRANJE OSJETNOG SPREMNIKA TOPLINE

Kako je cilj prikazati usporedni rad termoelektrane s različitim toplinskim spremnicima, odnosno rad latentnog i osjetnog toplinskog spremnika, vrijednosti na temelju kojih se spremnik dimenzionira, jednake su. To znači da je intenzitet zračenja i dnevni profil zračenja sunca jednak kao i kod dimenzioniranja latentnog toplinskog spremnika. Isto vrijedi i za radni medij (XCEL THERM® LV), radne temperature termoelektrane, zahtjeve generatora pare te sve ostale veličine koje nisu direktno vezane na svojstva medija za pohranu toplinske energije. Kao medij za pohranu toplinske energije potrebno je odabrati materijal koji faznu pretvorbu iz krutog u tekuće stanje (i obrnuto) ima na nižim temperaturama od minimalne radne temperature termoenergetskog postrojenja, kako bi materijal cijelo vrijeme bio u tekućem stanju, te kako bi se omogućilo osjetno skladištenje toplinske energije. Kao minimalna radna temperatura termoenergetskog postrojenja odabrana je temperatura od 200 °C.

Kao materijal za pohranu toplinske energije kod osjetnog toplinskog spremnika odabrana je sol trgovačkog naziva Hitec® kao mješavina 53% mase KNO₃, 40% mase NaNO₂ i 7% mase NaNO₃. Ova sol ima bolja svojstva od mješavine soli sa 60% NaNO₃ i 40% KNO₃ jer je njena temperatura fazne pretvorbe puno niža što omogućuje primjenu u komercijalnim solarnim termoelektranama. Glavni nedostatak Hitec® mješavine soli je oksidacija na temperaturama višim od 350 °C, te je u volumen spremnika potrebno uvoditi inertni plin kako bi se spriječila oksidacija. Kako je kod ovog postrojenja pretpostavljena maksimalna temperatura od 330 °C, problem oksidacije nije potrebno rješavati. Svojstva Hitec® soli mogu se vidjeti u tablici 9.[\[35\]](#)

Tablica 9. Svojstva medija za pohranu toplinske energije u osjetnom spremniku topline[\[36\]](#)

Hitec® (53% KNO ₃ + 40% NaNO ₂ + 7% NaNO ₃)	
Temperatura fazne pretvorbe	142 °C
Maksimalna radna temperatura	535 °C
Gustoća	1640 kg/m ³
Toplinska provodnost	0.57 W/mK
Specifični toplinski kapacitet	1.6 kJ/kgK

Iznos toplinske energije koji se skladišti u toplinski spremnik izračuna se prema istom izrazu kao i (4.2). Poznavanjem energije koja se skladišti u toplinskom spremniku, uz poznate radne temperature i specifični toplinski kapacitet medija za pohranu toplinske energije, može se izračunati masa potrebna za pohranu iznosa toplinske energije dobivenog izrazom (4.2).

$$M_{osj} = \frac{Q}{c_p \cdot (\vartheta_{iz} - \vartheta_u)} \quad (5.1)$$

gdje je:

- c_p specifični toplinski kapacitet medija za pohranu toplinske energije
- ϑ_u najniža temperatura medija za pohranu toplinske energije (200 °C)
- ϑ_{iz} najviša temperatura medija za pohranu toplinske energije (330 °C)

Volumen medija za pohranu toplinske energije (Hitec®) može se izraziti :

$$V_{osj} = \frac{d_{osj}^2 - d_{s,v}^2}{4} \cdot \pi \cdot L \cdot N \quad (5.2)$$

gdje je:

- d_{osj} promjer medija za pohranu toplinske energije
- $d_{s,v}$ promjer vanjske stjenke cijevi
- L duljina cijevi u spremniku topline
- N broj cijevi u spremniku topline

Izračunom mase medija za pohranu toplinske energije može se doći do potrebnog volumena preko znane gustoće medija. Time se iz izraza (5.2) može izraziti umnožak duljine i broja cijevi:

$$L \cdot N = \frac{4 \cdot M_{osj}}{\rho_{osj} \cdot \pi \cdot (d_{osj}^2 - d_{s,v}^2)} \quad (5.3)$$

U gornjem izrazu, kao i kod latentnog spremnika, odabire se jedna veličina. Odabire se duljina cijevi od 15 m, kao i kod dimenzioniranja latentnog spremnika topline. Odabirom duljine cijevi, preko izraza (5.3), može se izračunati potrebni broj cijevi izmjenjivača, odnosno toplinskog spremnika. Rezultate dimenzioniranja osjetnog spremnika može se vidjeti u tablici niže.

Tablica 10. Rezultati dimenzioniranja osjetnog spremnika topline

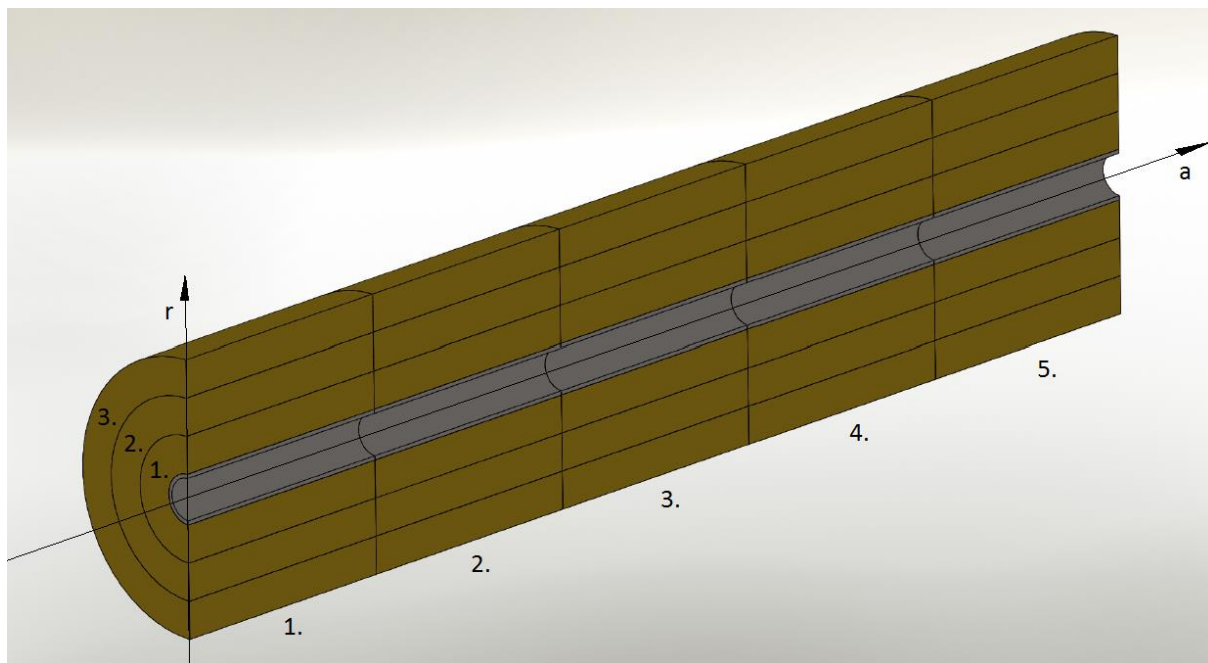
Dimenzioniranje osjetnog toplinskog spremnika	
Masa medija za pohranu toplinske energije	289.8 t
Volumen medija za pohranu toplinske energije	176.7 m ³
Visina toplinskog spremnika	15 m
Promjer medija za pohranu toplinske energije	300 mm
Debljina medija za pohranu toplinske energije	110 mm
Promjer spremnika topline	4 m
Broj cijevi	180

Analizom dimenzioniranja različitih spremnika za isti učin, odnosno za isti iznos skladištene energije, može se primijetiti kako je masa latentnog spremnika manja. To proizlazi iz glavne prednosti latentnog spremnika, što je mogućnost skladištenja energije na temelju latentne topline fazne pretvorbe. Time se omogućuje skladištenje energije bez potrebe za povećanjem mase medija za pohranu toplinske energije. Također daje prednost latentnim spremnicima topline zbog mogućnosti izmjene topline pri konstantnoj temperaturi medija. Uz veću masu, dolazi i problem većeg volumena, odnosno oplošja toplinskog spremnika. Povećanjem oplošja spremnika povećavaju se gubici spremnika prema okolini te time raste i cijena potrebna za njegovu izolaciju. Također je veća vjerojatnost da će medij u latentnom toplinskom spremniku na rubovima spremnika biti u krutom stanju te je tada dominantni način izmjene topline provođenje. Tu je glavni nedostatak latentnih spremnika, niska toplinska provodnost u krutom stanju, zapravo prednost, jer na vanjskim rubovima spremnik gubi manje topline prema okolišu. Kako je u osjetnom toplinskom spremniku medij cijelo vrijeme u temperaturnom režimu gdje je njegovo agregatno stanje tekuće, dominantni način izmjene topline je konvekcija te time osjetni spremnici gube više topline prema okolišu.

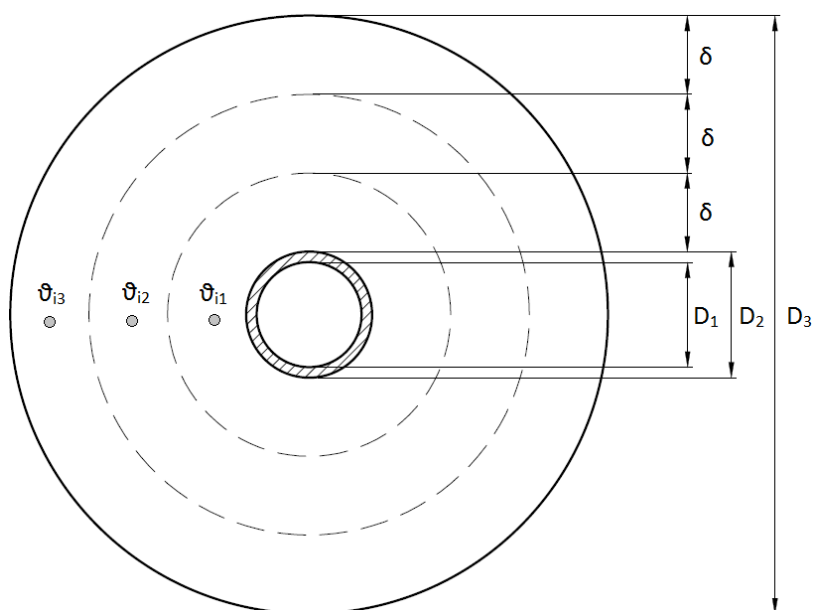
Ovdje su navedene samo neke mane i prednosti spremnika u tehnološkom smislu, no potrebna je opsežnija tehno-ekonomska analiza kako bi se u konačnosti moglo zaključiti koji toplinski spremnik je pogodniji za primjenu.

6. MATEMATIČKI MODEL SPREMNIKA TOPLINE

Model dinamike spremnika topline bit će opisan za jednu referentnu cijev oko koje se nalazi masa medija za skladištenje toplinske energije. Kroz referentnu cijev struji medij određenim masenim protokom. Kod latentnog spremnika topline masa medija fazne pretvorbe, kao i medij za pohranu topline kod osjetnog spremnika topline, bit će podijeljen na 5 odsječaka u smjeru strujanja radnog fluida, te u 3 odsječaka u radijalnom smjeru.



Slika 20. 3D prikaz podjele referentne cijevi na odsječke u aksijalnom i radijalnom smjeru



Slika 21. Prikaz odsječaka medija za pohranu toplinske energije u radijalnom smjeru

Matematički model sastoji se od jednadžba očuvanja energije za segmente radnog fluida, stijenku i segmente medija za pohranu toplinske energije. Pražnjenje spremnika se odvija u suprotnome smjeru od smjera protoka radnog medija tijekom punjenja spremnika kako bi se osigurala što bolja izmjena topline između radnog medija i segmenta medija za pohranu toplinske energije, koji se prilikom punjenja spremnika nalazio najdalje od ulaza radnog medija. Time matematički model opisuje i pražnjenje i punjenje spremnika.

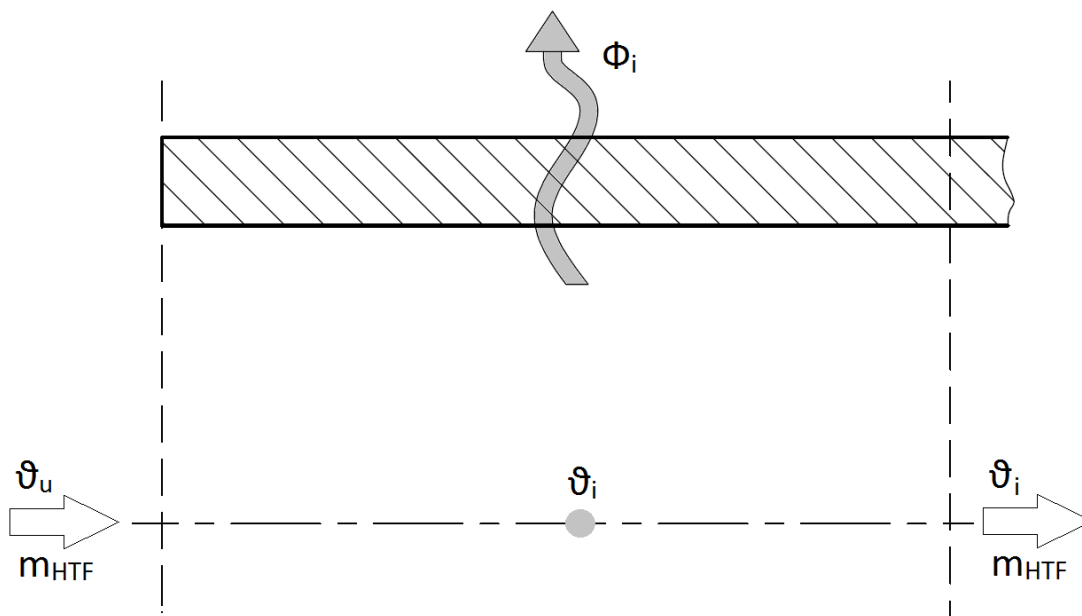
Kako bi se matematički model pojednostavio, a pritom zadržao što realniji fizikalni opis procesa, uvode se određene pretpostavke:

- Prolaz topline u aksijalnom i tangencionalnom smjeru je zanemaren te se topline izmjenjuje jedino u radijalnom smjeru
- Tekuća i kruta faza materijala fazne pretvorbe su homogena i izotropna
- U obzir se ne uzima promjena volumena tijekom fazne pretvorbe, kao ni promjena gustoće uslijed zagrijavanja
- Pretpostavlja se savršeni dodir radnog medija i stijenke, kao i medija za pohranu topline i stijenke
- Ne proučava se dinamika generatora pare već se samo osigurava potrebni toplinski tok za rad u stacionarnom stanju.
- Koeficijenti prijelaza topline na strani radnog medija te medija za pohranu topline uzimaju se konstantnim. Na strani radnog medija uzimati će se iznos od $500 \text{ W/m}^2\text{K}$, a na strani medija za pohranu se pretpostavlja da iznosi $35 \text{ W/m}^2\text{K}$
- U energetske jednadžbi za PCM prati se promjena entalpije te se naknadno računa temperatura PCM – a. To omogućuje izbjegavanje nezgodnog opisivanja ovisnosti promjene površine za izmjenu topline i otopljene mase jer izrazi nisu isti za pražnjenje i punjenje spremnika [\[24\]](#)
- Kod latentnog toplinskog spremnika, zbog male debljine stijenke i lakšeg određivanja uvjeta izmjene topline, temperatura se stijenke računa na njenom vanjskom rubu u dodiru s PCM – om.
- Zanemaruju su toplinski gubici u cijevnom razvodu od kolektora do spremnika, odnosno generatora pare, te od generatora pare, odnosno toplinskog spremnika prema kolektorima

- Pretpostavlja se da su gubici prema okolišu zanemarivi

6.1. Bilance energije latentnog toplinskog spremnika

6.1.1. Bilanca energije za radni fluid (XCEL THERM® LV)



Slika 22. Prikaz tokova energije za radni fluid

Općenito se energetska jednačba može zapisati kao jednakost brzine promjene unutarnje energije radnog medija i razlike svih tokova energije koji ulaze odnosno izlaze iz kontrolnog volumena.

$$\frac{dE_{HTF,o}}{dt} = e_{ulaz} - e_{izlaz} \quad (6.1)$$

te dalje slijedi:

$$M_{HTF,o} \cdot c_{p,HTF} \cdot \frac{d\vartheta_i}{dt} = m_{HTF} \cdot (c_{p,HTF} \cdot \vartheta_{i-1} - c_{p,HTF} \cdot \vartheta_i) - \Phi_i \quad (6.2)$$

$i = 1, 2, 3, 4, 5$ što predstavlja indekse odsječaka u aksijalnom smjeru

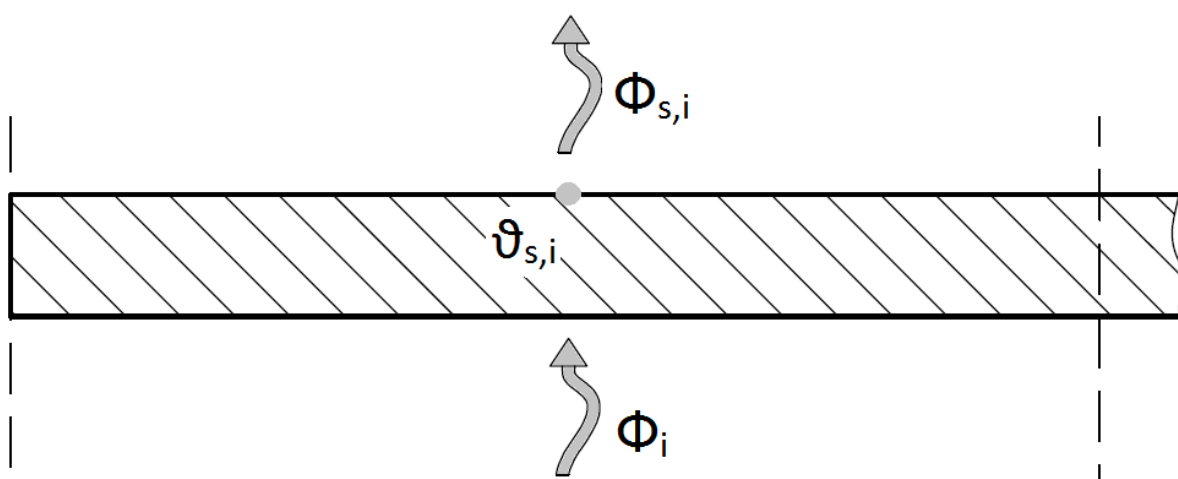
gdje je:

- $M_{HTF,o}$ masa radnog medija u odsječku ($M_{HTF}/5$)
- $c_{p,HTF}$ specifični toplinski kapacitet radnog medija
- m_{HTF} maseni protok radnog medija

- ϑ_{i-1} ulazna temperatura u segment
- ϑ_i izlazna temperatura iz segmenta
- Φ_i je toplinski tok prema stijenci u svakom segmentu

Kod prvog segmenta u aksijalnom smjeru, temperatura ulaza (ϑ_0) je temperatura radnog medija na izlazu iz kolektora te je u svakom sljedećem $i+1$ segmentu ulaz jednak temperaturi i -tog segmenta. Kod pražnjenja maseni protok suprotnog je smjera, te uz pozitivni prirast temperature odsječaka uz negativni toplinski tok, jednadžbe prikazuju i pražnjenje i punjenje spremnika. Iz izraza (6.2) može se izraziti promjena temperature segmenata.

6.1.2. Bilanca energije za stijenku cijevi



Slika 23. Prikaz tokova energije za stijenku

Općenito se može zapisati:

$$\frac{dE_{s,o}}{dt} = e_{ulaz} - e_{izlaz} \quad (6.3)$$

te dalje slijedi:

$$M_{s,o} \cdot c_{p,s} \cdot \frac{d\vartheta_{s,i}}{dt} = \Phi_i - \Phi_{s,i} \quad (6.4)$$

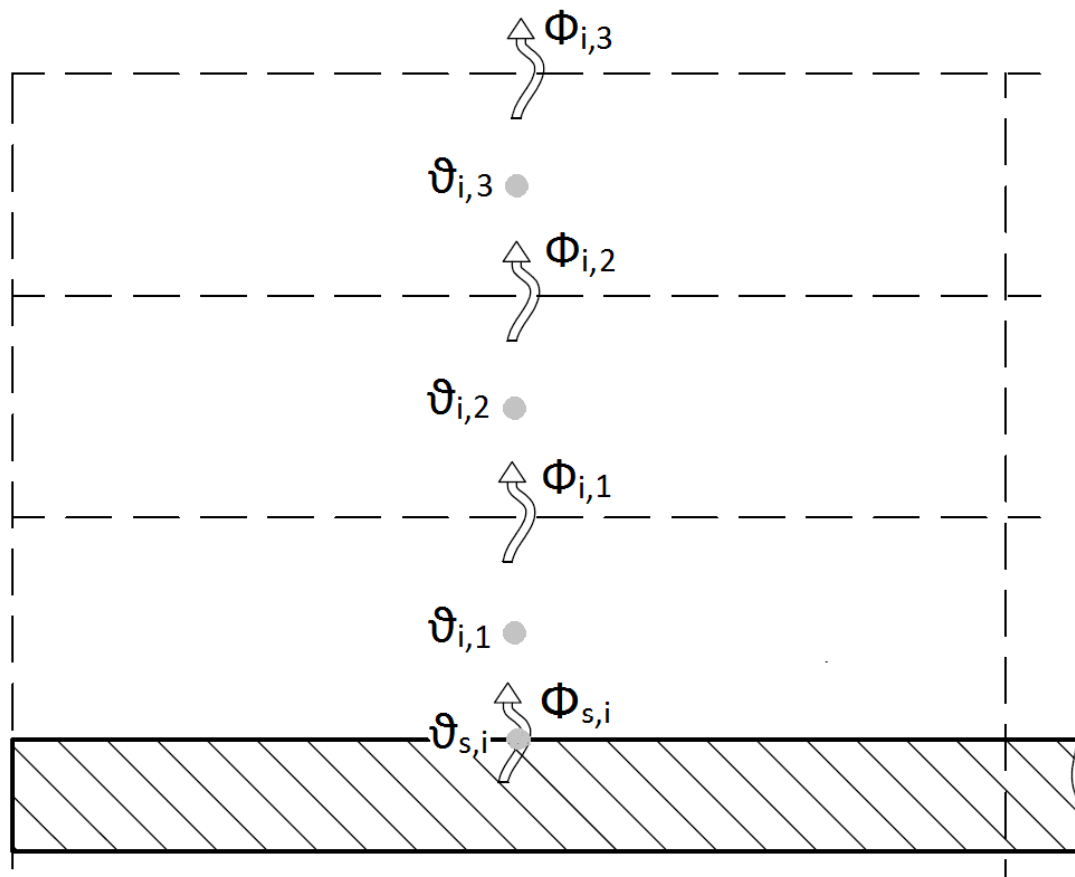
$i = 1, 2, 3, 4, 5$ što predstavlja indekse odsječaka u aksijalnom smjeru

gdje je:

- $M_{s,o}$ masa odsječka cijevi ($M_s/5$)
- $c_{p,s}$ specifični toplinski kapacitet čeličnih cijevi
- $\vartheta_{s,i}$ temperatura odsječka stijenke cijevi u dodiru sa PCM – om

- Φ_i je toplinski tok prema stijenci u svakom odsječku
- $\Phi_{s,i}$ je toplinski tok koji prelazi sa stijenske cijevi na prvi odsječak PCM – a

6.1.3. Bilanca energije za odsječke PCM – a u radijalnom smjeru



Slika 24. Prikaz tokova energije za medij pohrane toplinske energije

Za medij fazne pretvorbe (PCM) zapisuju se tzv. entalpijske jednadžbe gdje se promatra brzina promjene entalpije, za razliku od brzine promjene temperature PCM – a. Na temelju entalpije, dodatnim se izrazima računa temperatura odsječaka PCM – a. [37] Općenito se može zapisati:

$$\frac{dE_{PCM,o}}{dt} = e_{ulaz} - e_{izlaz} \quad (6.5)$$

te dalje za prvi odsječak u radijalnom smjeru vrijedi:

$$M_{PCM,o} \cdot \frac{dh_{PCM,i,1}}{dt} = \Phi_{s,i} - \Phi_{i,1} \quad (6.6)$$

$i = 1, 2, 3, 4, 5$ što predstavlja indekse odsječaka u aksijalnom smjeru

gdje je:

- $M_{PCM,o}$ masa odsječka u radijalnom smjeru ($M_{PCM}/15$)
- $\Phi_{s,i}$ je toplinski tok koji prelazi sa stijenke cijevi na prvi segment PCM – a
- $\Phi_{i,1}$ je toplinski tok koji prelazi sa prvog odsječka na drugi, u radijalnom smjeru

Za drugi i treći odsječak u radijalnom smjeru vrijedi:

$$M_{PCM,o} \cdot \frac{dh_{PCM,i,j}}{dt} = \Phi_{i,j-1} - \Phi_{i,j} \quad (6.7)$$

$i = 1, 2, 3, 4, 5$ što predstavlja indekse odsječaka u aksijalnom smjeru

$j = 2, 3$ što predstavlja indekse 2. i 3. odsječaka u radijalnom smjeru

Vrijednosti entalpija mogu se podijeliti u 3 područja. Temeljem izračunate entalpije i područja u kojem se nalazi, računa se temperatura odsječka PCM – a ($T_{PCM,i,j}$). Tako vrijedi:

$$T_{PCM,i,j} = \frac{h_{PCM,i,j}}{c_{p,k}} \quad \text{za } h_{PCM,i,j} < h_{poc,t} \quad (6.8)$$

$$T_{PCM,i,j} = T_t \quad \text{za } h_{poc,t} < h_{PCM,i,j} < h_{poc,t} + r \quad (6.9)$$

$$T_{PCM,i,j} = \frac{h_{PCM,i,j} - (h_{poc,t} + r)}{c_{p,t}} + T_t \quad \text{za } h_{PCM,i,j} > h_{poc,t} + r \quad (6.10)$$

gdje je:

- $h_{poc,t}$ entalpija PCM – a u trenutku početka taljenja PCM – a
- r latentna toplota PCM – a
- T_t je temperatura taljenja PCM – a
- $c_{p,k}$ specifični toplinski kapacitet krute faze
- $c_{p,t}$ specifični toplinski kapacitet kapljevite faze

6.2. Toplinski tokovi latentnog toplinskog spremnika

6.2.1. Toplinski tok radni medij – stijenska

Prolaz topline odvija se konvekcijom na unutarnjem rubu stijenke i provođenjem kroz debljinu stijenke. Toplinski tok iz jednadžbe (6.2) može se izraziti:

$$\Phi_i = \frac{2\pi L N \cdot (\vartheta_i - \vartheta_{s,i})}{\frac{1}{R_1 \alpha_u} + \frac{1}{\lambda_s} \ln \frac{R_2}{R_1}} \quad (6.11)$$

Kako je navedeno i prije, radi jednostavnosti postavljanja uvjeta taljenja PCM – a, temperatura stijenke računa se na njenom vanjskom rubu. Na unutarnjoj stijenci uzima se konstantni koeficijent prijelaza topline za strujanje radnog medija (XCELTHERM®LV). Pretpostavlja se da je vrijednost koeficijenta prijelaza topline na unutarnjoj stijenci cijevi jednak 500 W/m²K.

6.2.2. Toplinski tok stijenka – prvi odsječak u radijalnom smjeru

Transport topline odvija se procesom difuzije odnosno prirodne konvekcije koja je rezultat razlike u temperaturi, odnosno gustoći između slojeva medija za pohranu toplinske energije. Zbog pojave razlike u gustoći, dolazi do prirodne cirkulacije medija. Uz prirodnu konvekciju toplina se izmjenjuje i provođenjem kroz medij pohrane kada je medij na temperaturama nižim od temperature fazne pretvorbe. Prirodna konvekcija modelira se kao model provođenja topline gdje se definira efektivna toplinska provodnost λ_{ef} . Efektivna toplinska provodnost je "poboljšana" toplinska provodnost medija koja se definira kao umnožak ekvivalentne i stvarne toplinske provodnosti. Ekvivalentna toplinska provodnost (λ_{ekv}) definira se kao omjer toplinskog toka koji se prenese mehanizmom provođenja i konvekcije te toplinskog toka koji se prenese samo modelom provođenja. Mnogi znanstvenici pokušavali su odrediti ovisnosti ekvivalentne toplinske provodnosti o protočnim parametrima.[\[38\]](#) Kako ne postoje izrazi ili rezultati mjerenja ekvivalentne toplinske provodnosti za NaNO₃ kao ni za sol Hitec® proizvoljno je određeno da je ekvivalentna toplinska provodnosti jednaka 4, odnosno da je efektivna toplinska provodnost 4 puta veća od stvarne. Tako se može izraziti:

$$\lambda_{ef} = \lambda_{ekv} \cdot \lambda \quad (6.12)$$

$$\lambda_{ekv} = \frac{\Phi_{kond+konv}}{\Phi_{kond}} \quad (6.13)$$

Tako je toplinski tok opisan kao čisto provođenje uz promjenjivu toplinsku provodnost. Toplinski tok između stijenke i prvog segmenta u radijalnom smjeru definiran je zbrojem konvekcije u dodiru sa stijenkom i "poboljšanim" provođenjem kroz medij pohrane topline. Kako se promjenom temperature mijenja agregatno stanje medija za pohranu, potrebno je definirati potrebnu toplinsku provodnost u ovisnosti o temperaturi segmenta. Tako se može definirati ovisnost:

$$\lambda_{i,j} = \lambda_k \cdot x_{i,j} + \lambda_l \cdot (1 - x_{i,j}) \quad (6.14)$$

$$x_{i,j} = \frac{h_{kraj,t} - h_{i,j}}{r} \quad (6.15)$$

$i = 1, 2, 3, 4, 5$ što predstavlja indekse odsječaka u aksijalnom smjeru

$j = 1, 2, 3$ što predstavlja indekse 1., 2. i 3. odsječaka u radijalnom smjeru

gdje je:

- $\lambda_{i,j}$ toplinska provodnost odsječaka u radijalnom smjeru
- λ_k toplinska provodnost medija u krutom stanju
- λ_l efektivna toplinska provodnost
- $x_{i,j}$ udio krute faze u odsječku definiran omjerom entalpija
- $h_{kraj,t}$ entalpija PCM – a na kraju taljenja ($h_{poc,t} + r$)
- r latentna toplota PCM – a

Definiranjem toplinske provodnosti može se izvesti izraz za toplinski tok između stijenke i prvog odsječaka u radijalnom smjeru:

$$\Phi_{s,i} = \frac{2\pi L N \lambda_{i,1} \cdot (\vartheta_{s,i} - \vartheta_{i,1})}{\ln \frac{R_2 + 0.5\delta}{R_2}} + 2\pi L N \alpha_v R_2 \cdot (1 - x_{i,1}) \quad (6.16)$$

gdje je:

- $\lambda_{i,1}$ toplinska provodnost prvog odsječaka u radijalnom smjeru
- R_2 radijus vanjske stijenke cijevi
- δ debljina odsječaka u radijalnom smjeru
- α_v koeficijent prijelaza topline na vanjskoj stijenci cijevi
- $x_{i,1}$ udio krute faze prvog odsječaka u radijalnom smjeru

6.2.3. Toplinski tok prvi – drugi i drugi - treći odsječak

Jednako kao i kod toplinskog toka između stijenke i prvog odsječaka u radijalnom smjeru, definira se toplinska provodnosti preko izraza (6.12). Toplinski tok definiran je kao zbroj "poboljšanog" provođenja kroz drugu polovicu prvog odsječaka i prvu polovicu drugog. Jednako tako je toplinski tok sa drugog na treći odsječak jednak zbroju "poboljšanog" provođenja kroz drugu polovicu drugog i prvu polovicu trećeg odsječaka. Tako se može izraziti:

$$\Phi_{i,1} = \frac{2\pi LN\lambda_{i,1} \cdot (\vartheta_{i,1} - \vartheta_{i,2})}{\ln \frac{R_2 + \delta}{R_2 + 0.5\delta}} + \frac{2\pi LN\lambda_{i,2} \cdot (\vartheta_{i,1} - \vartheta_{i,2})}{\ln \frac{R_2 + 1.5\delta}{R_2 + \delta}} \quad (6.17)$$

$$\Phi_{i,2} = \frac{2\pi LN\lambda_{i,2} \cdot (\vartheta_{i,2} - \vartheta_{i,3})}{\ln \frac{R_2 + 2\delta}{R_2 + 1.5\delta}} + \frac{2\pi LN\lambda_{i,3} \cdot (\vartheta_{i,2} - \vartheta_{i,3})}{\ln \frac{R_2 + 2.5\delta}{R_2 + 2\delta}} \quad (6.18)$$

$i = 1, 2, 3, 4, 5$ što predstavlja indekse odsječaka u aksijalnom smjeru

6.2.4. Toplinski tok treći odsječak – okoliš

Kao što je ranije spomenuto, s ciljem pojednostavljenja matematičkog modela, uvedena je pretpostavka kako su gubici toplinskog spremnika zanemarivi, odnosno da nema izmjene topline između spremnika i okoline.

6.3. Bilance energije osjetnog toplinskog spremnika

Transport topline u osjetnom spremniku odvija se jednako kao kod latentnog spremnika odnosno kao što je prikazano na slikama 22., 23., 24, te je jedina razlika u izrazima koji definiraju toplinske tokove. Bilanca energije za radni fluid kod osjetnog spremnika jednaka je onoj kod latentnog toplinskog spremnika, kao što i bilanca energije za odsječak cijevi (6.4) općenito vrijedi i za osjetni spremnik. Za razliku od latentnog toplinskog spremnika, kod osjetnog se spremnika ne moraju zapisivati entalpijske jednadžbe pa se tako energetske jednadžbe za odsječke medija za pohranu topline mogu zapisati uz izraženu promjenu temperature odsječaka u vremenu. Energetska jednadžba za prvi odsječak može se zapisati:

$$M_{osj,o} \cdot c_{p,osj} \cdot \frac{d\vartheta_{i,1}}{dt} = \Phi_{s,i} - \Phi_{i,1} \quad (6.19)$$

$i = 1, 2, 3, 4, 5$ što predstavlja indekse odsječaka u aksijalnom smjeru

gdje je:

- $M_{osj,o}$ masa odsječaka medija za pohranu toplinske energije ($M_{osj}/15$)
- $c_{p,osj}$ specifični toplinski kapacitet
- $\Phi_{s,i}$ je toplinski tok koji prelazi sa stijenke cijevi na prvi odsječak u radijalnom smjeru
- $\Phi_{i,1}$ je toplinski tok koji prelazi s prvog odsječaka na drugi, u radijalnom smjeru

Energetska jednadžba za drugi i treći odsječak u radijalnom smjeru može se zapisati:

$$M_{osj,o} \cdot c_{p,osj} \cdot \frac{d\vartheta_{osj,i,j}}{dt} = \Phi_{i,j-1} - \Phi_{i,j} \quad (6.20)$$

$i = 1, 2, 3, 4, 5$ što predstavlja indekse odsječaka u aksijalnom smjeru

$j = 2, 3$ što predstavlja indekse 2. i 3. odsječaka u radijalnom smjeru

6.4. Toplinski tokovi osjetnog toplinskog spremnika

Toplinski tok s radnog medija na stijenku jednak je izrazu (6.11). Prolaz topline sa stijenke na medij za pohranu toplinske energije definiran je kao i kod latentnog toplinskog spremnika. Definira se kao zbroj konvekcije sa vanjske stijenke cijevi i "poboljšanog" provođenja kroz sloj medija za pohranu toplinske energije. Za razliku od latentnog spremnika topline, medij za pohranu je kod osjetnog spremnika cijelo vrijeme u kapljevitom stanju te nije potrebno u svakome trenutku računati efektivnu toplinsku provodnost. Pretpostavlja se da je 4 puta veća od stvarne toplinske provodnosti medija za pohranu. Tako se toplinski tok sa stijenke na prvi odsječak u radijalnom smjeru može definirati kao:

$$\Phi_{s,i} = \frac{2\pi L N \lambda_l \cdot (\vartheta_{s,i} - \vartheta_{i,1})}{\ln \frac{R_2 + 0.5\delta}{R_2}} + 2\pi L N \alpha_v R_2 \quad (6.21)$$

Toplinski tok između segmenata može se izraziti:

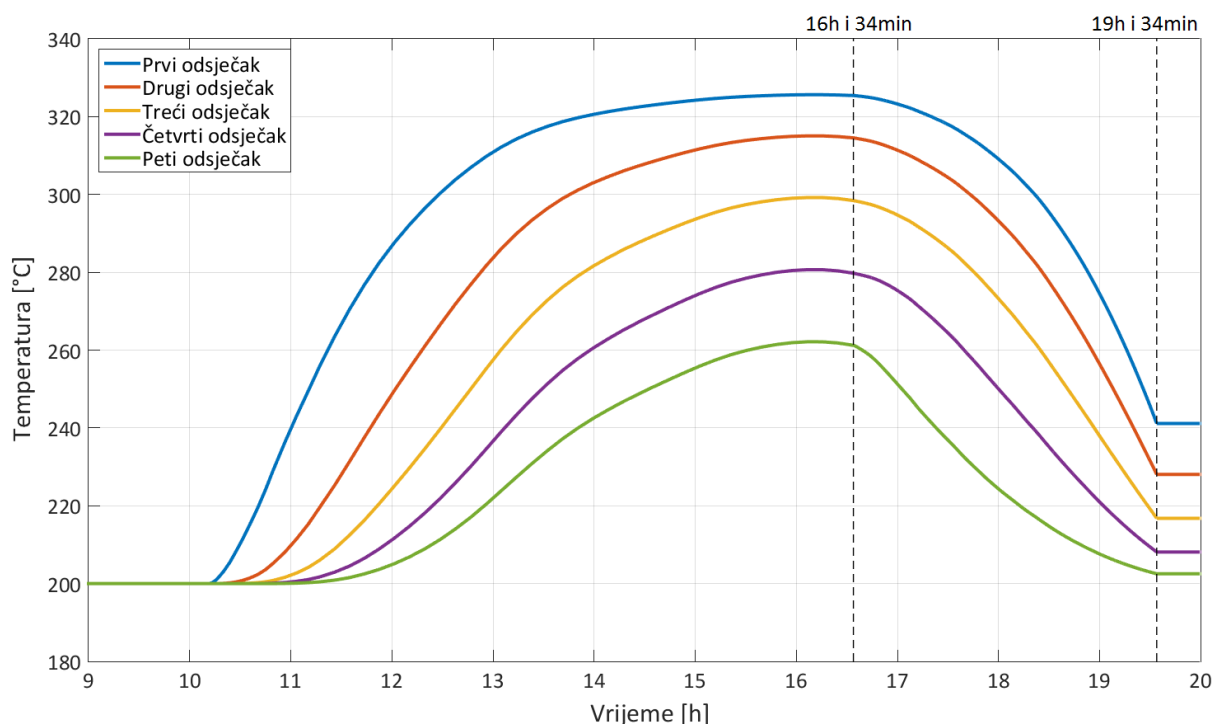
$$\Phi_{i,1} = \frac{2\pi L N \lambda_l \cdot (\vartheta_{i,1} - \vartheta_{i,2})}{\ln \frac{R_2 + 1.5\delta}{R_2 + 0.5\delta}} \quad (6.22)$$

$$\Phi_{i,2} = \frac{2\pi L N \lambda_l \cdot (\vartheta_{i,2} - \vartheta_{i,3})}{\ln \frac{R_2 + 2.5\delta}{R_2 + 1.5\delta}} \quad (6.23)$$

7. REZULTATI SIMULACIJE OSJETNOG SPREMNIKA TOPLINE

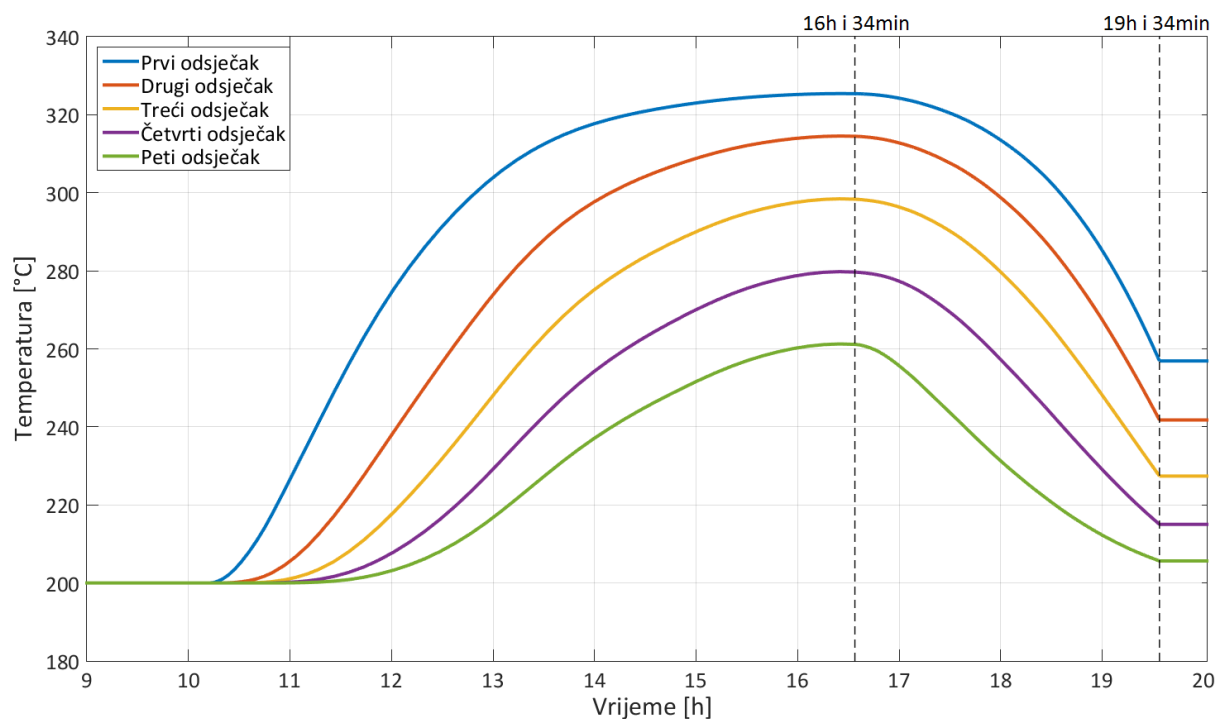
Matematički model punjenja i pražnjenja osjetnog spremnika topline napravljen je u Simulinku. U jednadžbe spadaju energetske jednadžbe radnog medija, stijenke, te tri odsječka radnog medija u radijalnom smjeru. Trenutak punjenja spremnika je određen trenutkom kada je toplinski tok iz kolektora jednak toplinskom toku koji zahtijeva generator pare za stacionarni rad. Pretpostavlja se da generator pare radi cijelo vrijeme na maksimalnom opterećenju te da nema promjene snage tijekom rada postrojenja. Punjenje spremnika odvija se do trenutka kada toplinski tok iz kolektora više nije dovoljan za stacionarni rad generatora pare, te u tome trenutku dolazi do pražnjenja toplinskog spremnika. Tijekom pražnjenja koristi se i toplinski tok iz kolektora, te se zahtijeva da zajednički toplinski tok iz kolektora i iz toplinskog spremnika osigura minimalno trosatno produljenje rada generatora pare. Iz rezultata će se moći zaključiti da je moguće produljenje rada i duže od 3 h jer se u obzir uzima i toplinski tok iz kolektora. U rezultatima će se pokazati temperaturni profili radnog medija i medija za pohranu toplinske energije.

Vrijeme početka punjenja i kraja pražnjenja spremnika na dijagramima bit će prikazano crnom crtkanom linijom, te će temperaturni profili biti prikazani samo za vrijeme trosatnog produljenja rada kako bi se prikazalo ostvarivanje traženog produljenja rada.

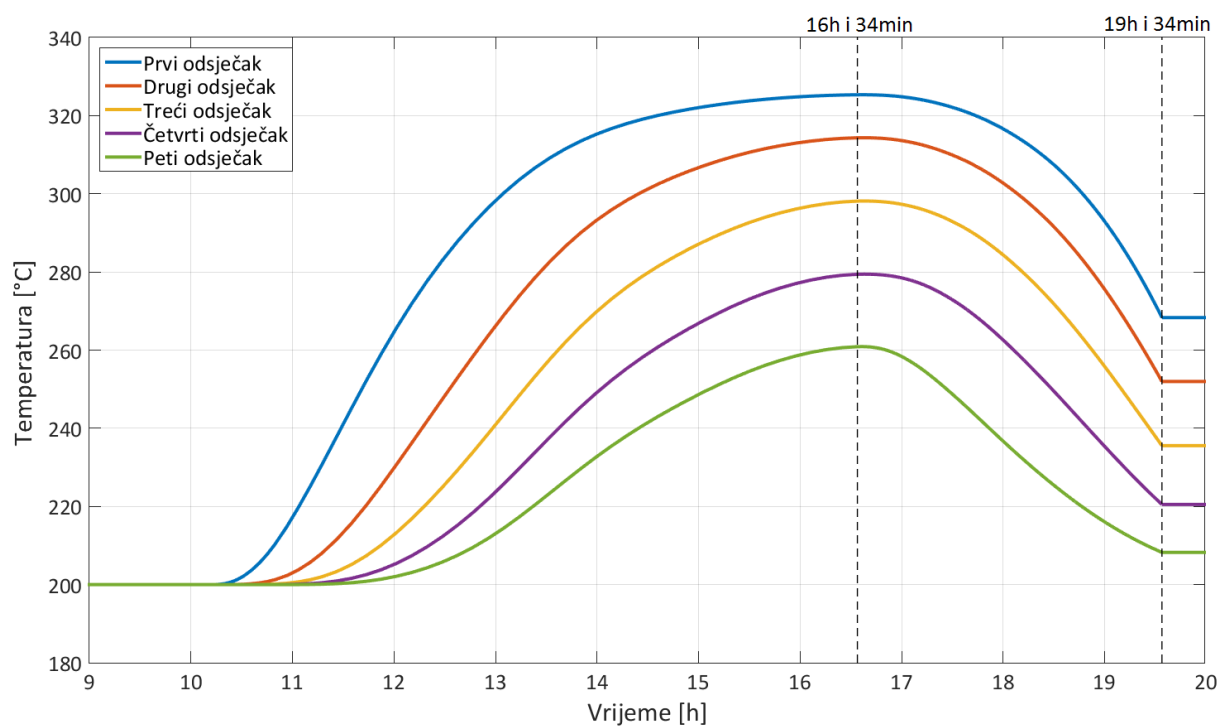


Slika 25. Temperaturni profil radnog fluida po odsječcima u aksijalnom smjeru

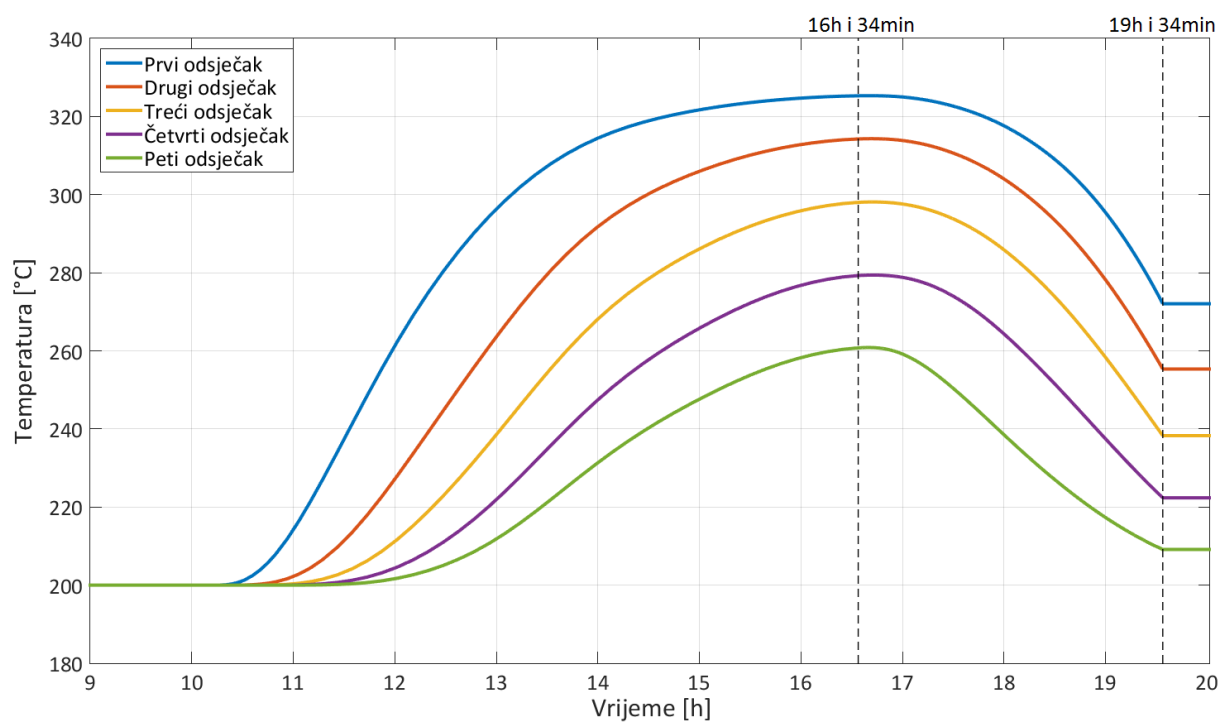
Na gornjem dijagramu prikazan je temperaturni profil radnog medija u aksijalnom smjeru te se pretpostavlja da je sustav predgrijan na početnu temperaturu od 200 °C. Na dijagramu se može primijetiti vrijeme kraja punjenja i kraja pražnjenja spremnika te ostvareno trosatno produljenje rada solarne termoelektrane.



Slika 26. Temperaturni profil prvih odsječaka u radijalnom smjeru, prikazani u aksijalnom smjeru

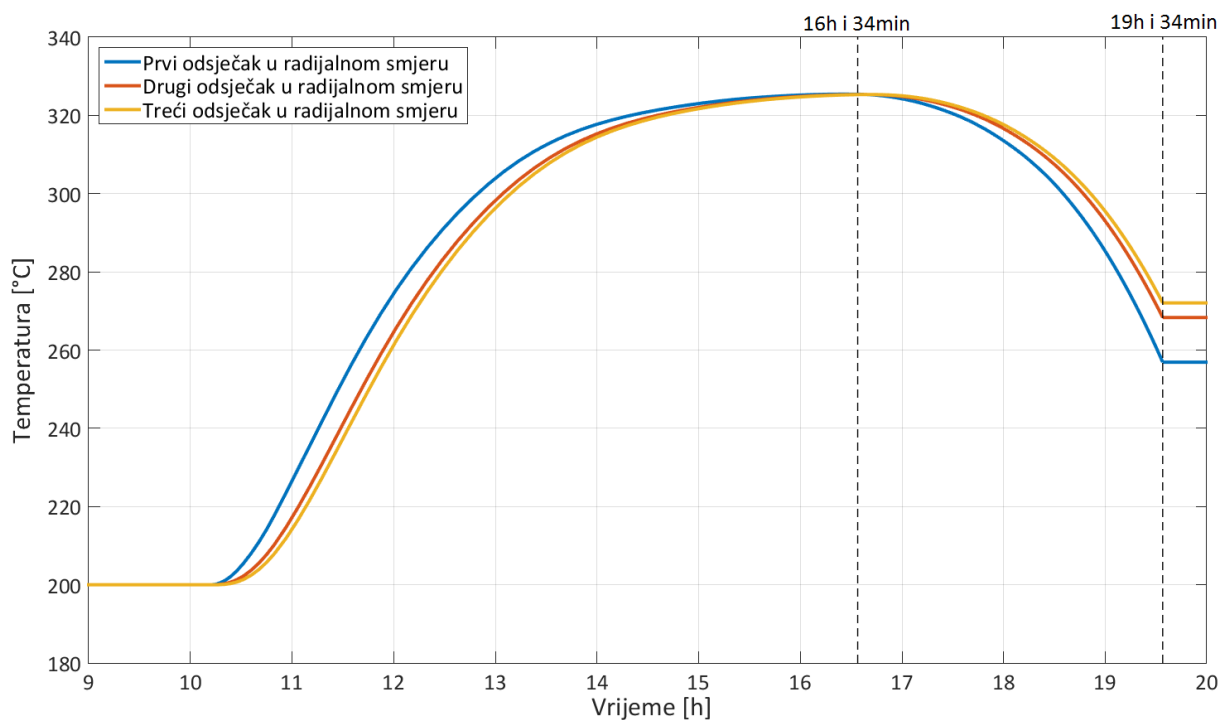


Slika 27. Temperaturni profil drugih odsječaka u radialnom smjeru, prikazani u aksijalnom smjeru

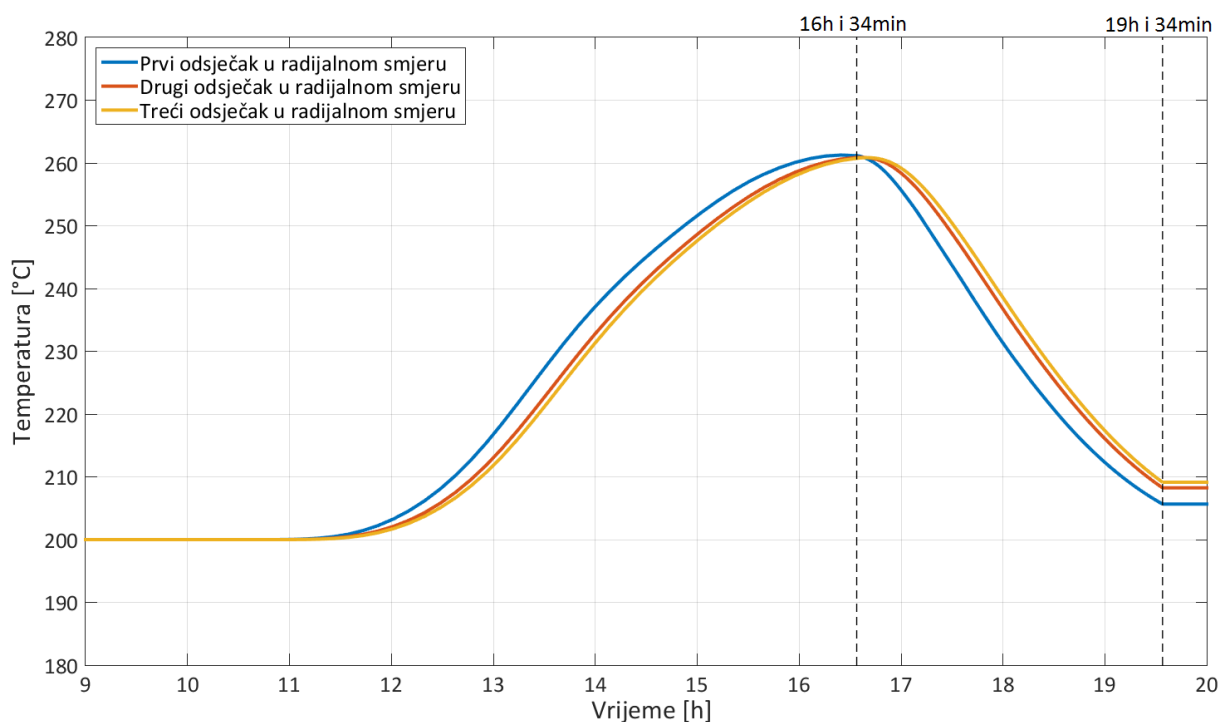


Slika 28. Temperaturni profil trećih odsječaka u radialnom smjeru, prikazani u aksijalnom smjeru

U daljnjim rezultatima bit će prikazani temperaturni profili medija za pohranu u radialnim smjerovima za svaki odsječak u aksijalnom smjeru.



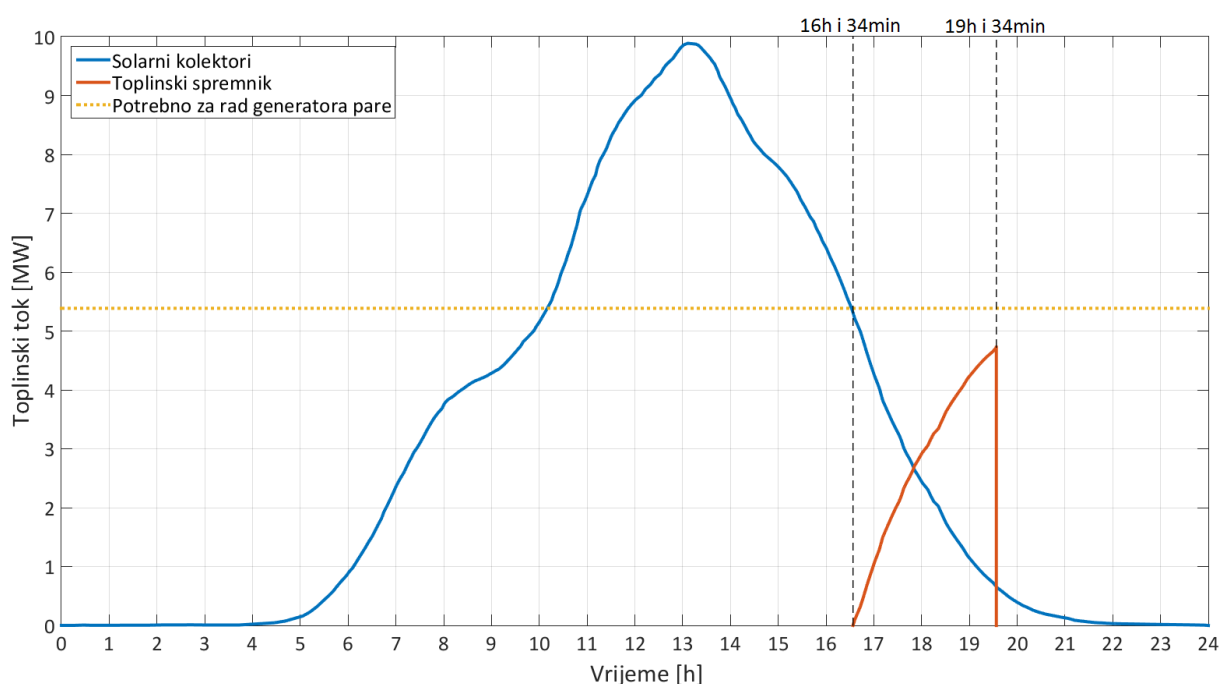
Slika 29. Temperaturni profil medija za pohranu toplinske energije u radijalnom smjeru prikazan za prvi odsječak u aksijalnom smjeru



Slika 30. Temperaturni profil medija za pohranu toplinske energije u radijalnom smjeru prikazan za peti odsječak u aksijalnom smjeru

Na slikama 29. i 30. mogu se primijetiti temperaturni profili medija za pohranu toplinske energije tijekom punjenja i pražnjenja spremnika. Pregledom slika može se doći do

zaključka o smjeru strujanja radnog medija (XCEL THERM[®] LV) prilikom punjenja odnosno pražnjenja spremnika. Može se zaključiti kako je strujanje radnog medija prilikom punjenja u smjeru porasta numeracije aksijalnih odsječaka jer je brzina prirasta temperature najveća, te u prvom aksijalnom odsječku dolazni do najbržeg zagrijavanja medija za pohranu. Također se može primijetiti kako je i temperatura nakon kraja punjenja spremnika najviša u prvim odsječcima, te je sve manja s većom udaljenošću od ulaza radnog medija. Zaključiti se može i da je smjer strujanja radnog medija prilikom punjenja suprotan onom kod pražnjenja, jer je najbrži pad temperature u zadnjem odsječku u aksijalnom smjeru. To je učinjeno kako bi se iskoristila niža temperatura medija u krajnjem odsječku.



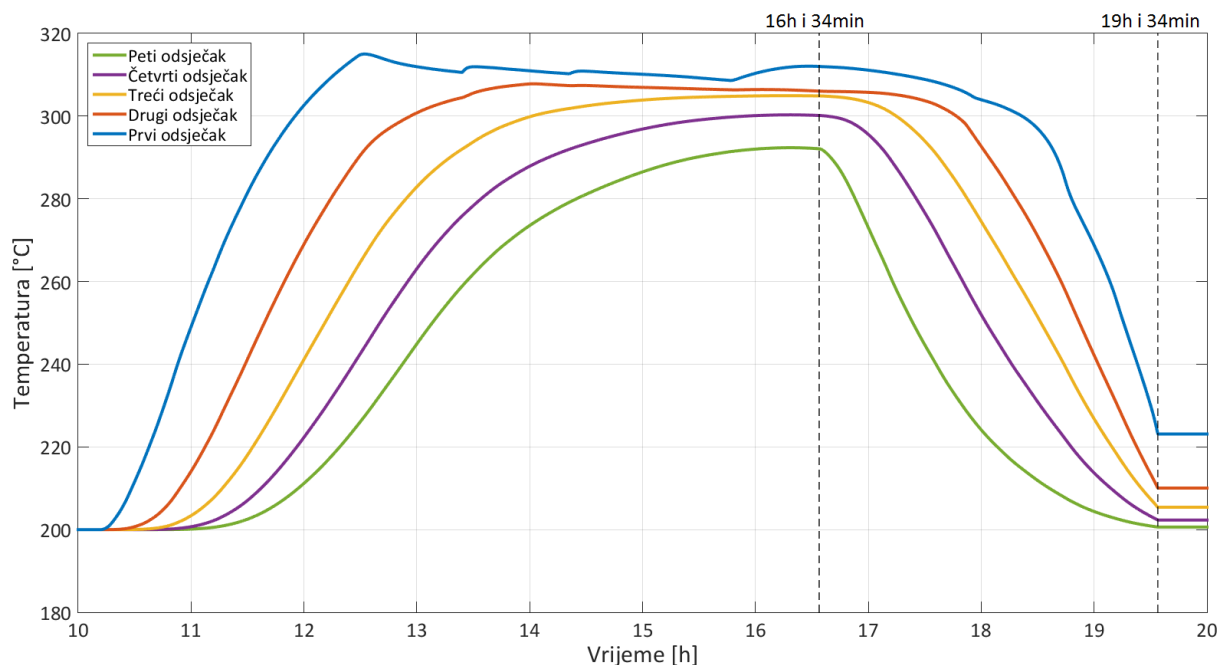
Slika 31. Prikaz toplinskog toka koji se dobiva iz kolektorskog polja i toplinskog spremnika uz prikaz potrebnog toplinskog toka za stacionarni rad generatora pare

Na gornjoj slici mogu se primijetiti toplinski tokovi iz kolektorskog polja i toplinski tok koji se dobiva iz toplinskog spremnika za trosatno produljenje rada. Usporedbom površina ispod linije toplinskog toka toplinskog spremnika i onoga što se u njega uskladišti, može se zaključiti kako toplinski spremnik nije u potpunosti iskorišten i da se rad termoelektrane može produljiti i za više od 3h, jer se koristi i toplinski tok dobiven u kolektorskom polju. Isto se može zaključiti i iz temperaturnih profila odsječaka medija za pohranu, koji se i nakon 3h rada spremnika nalaze na temperaturama višim od početne temperature.

8. REZULTATI SIMULACIJE LATENTNOG SPREMNIKA TOPLINE

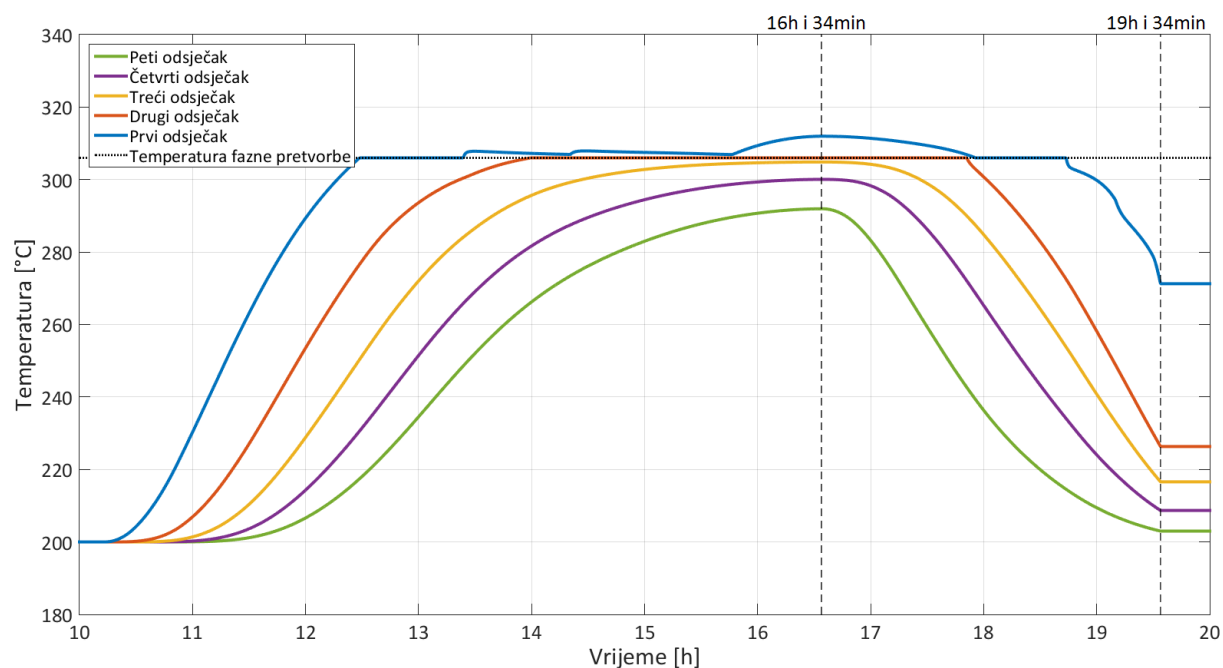
Kao i za osjetni toplinski spremnik, bit će prikazani rezultati simulacije rada latentnog spremnika topline. Prikazat će se temperaturni profili radnog fluida i medija za pohranu topline te će se izvesti određeni zaključci o radu latentnog toplinskog spremnika.

Prvo će biti prikazani temperaturni profili odsječaka u aksijalnom smjeru za j – ti segment u radijalnom smjeru.

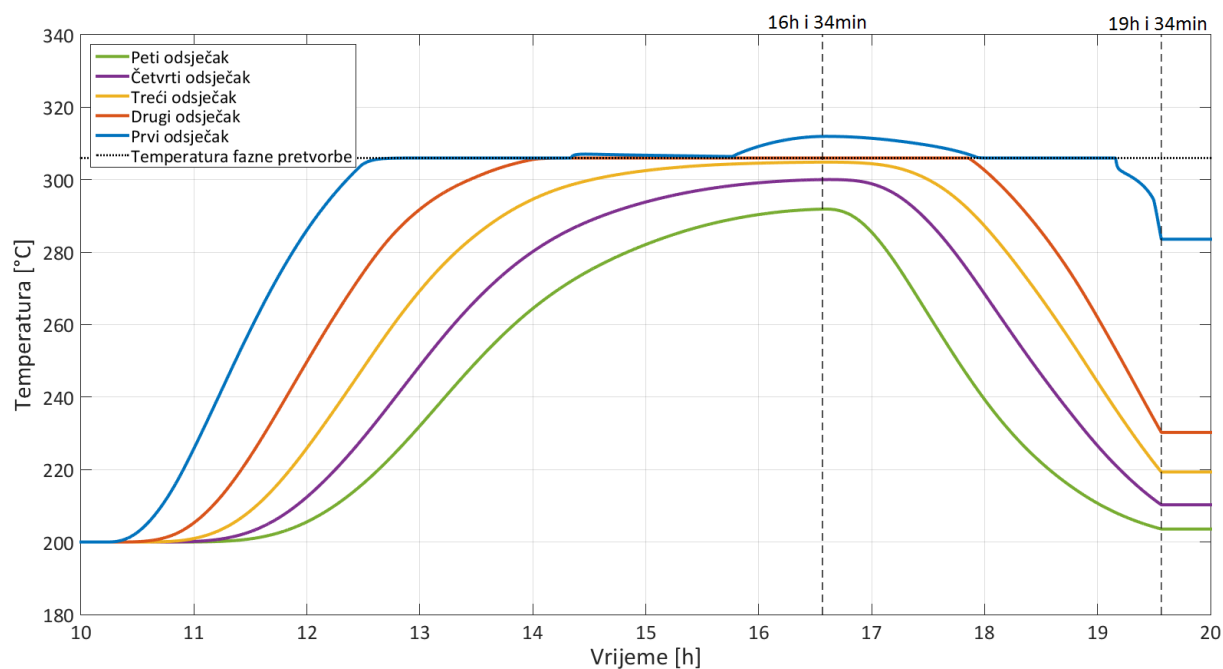


Slika 32. Temperaturni profil radnog fluida po odsječcima u aksijalnom smjeru

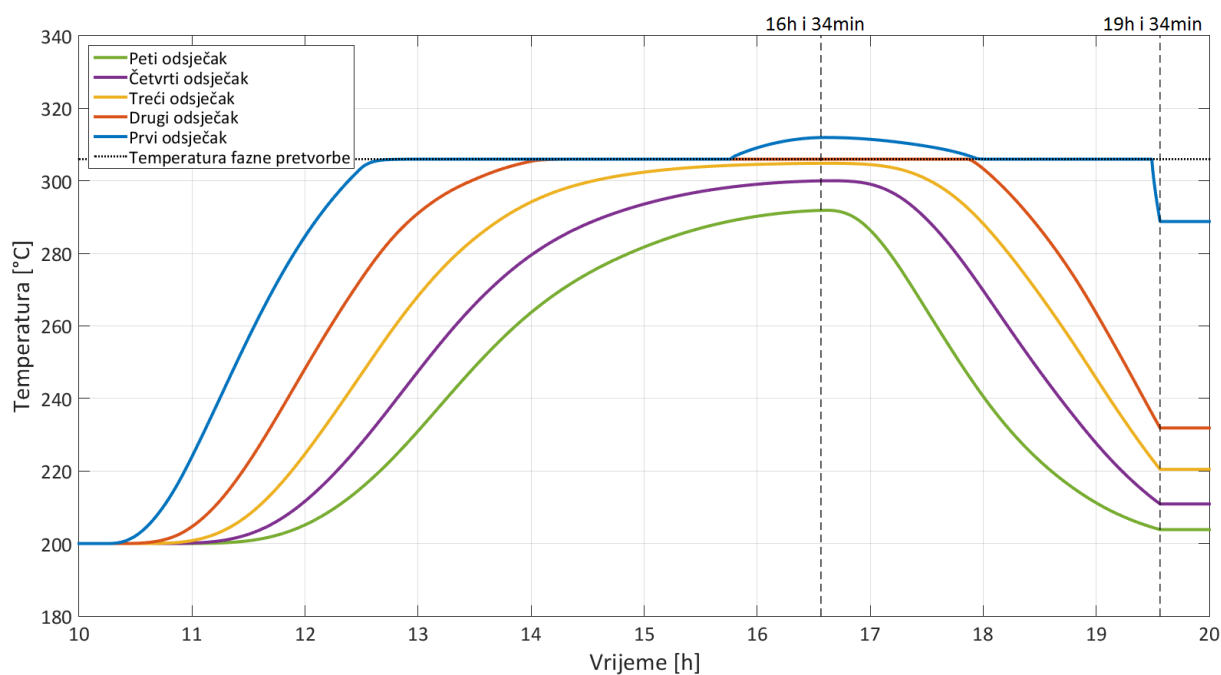
Na dijagramima je isprekidanim linijama prikazano vrijeme kraja punjenja odnosno početka pražnjenja te vrijeme kraja pražnjenja spremnika topline. Specifični oblik krivulje prvog odsječka na slici 32. rezultat je izotermnog procesa izmjene topline gdje krivulja temperature prvog odsječka u radijalnom smjeru više ne prati oblik temperaturne krivulje radnog fluida odnosno stijenke u tom odsječku. Prvi odsječak medija za pohranu topline je na temperaturi fazne pretvorbe gdje mu je temperatura konstantna. Na sljedećim dijagramima moći će se primijetiti temperaturni profili medija za pohranu topline.



Slika 33. Temperaturni profil prvih odsječaka u radijalnom smjeru, prikazani u aksijalnom smjeru

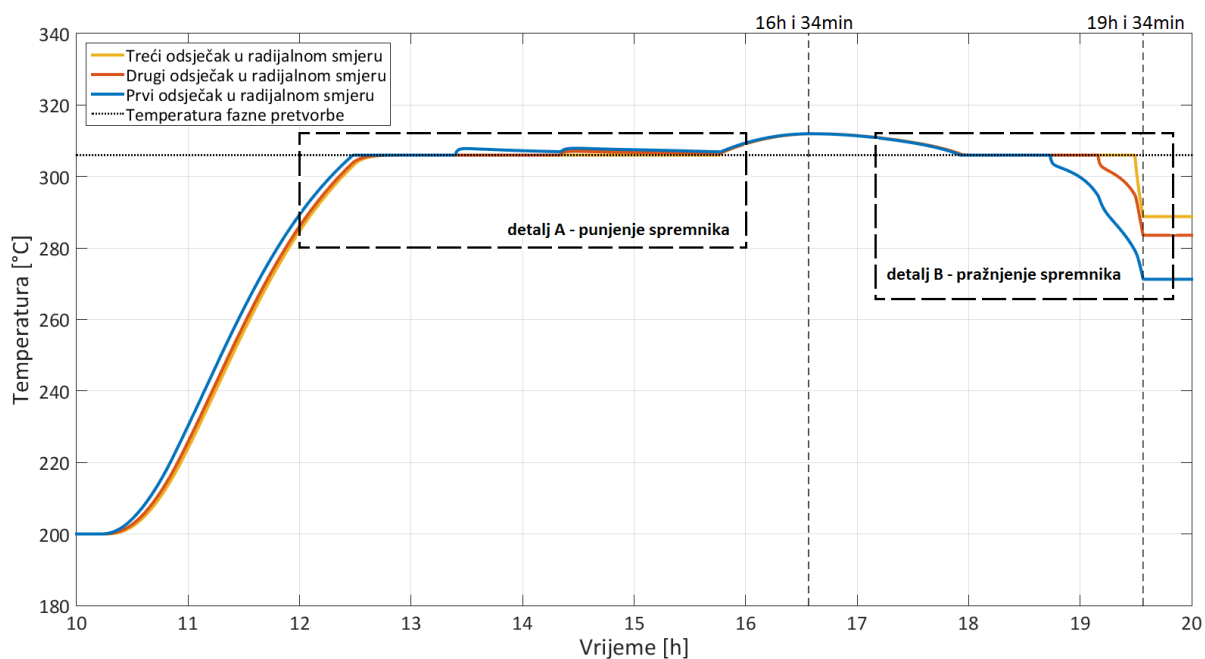


Slika 34. Temperaturni profil drugih odsječaka u radijalnom smjeru, prikazani u aksijalnom smjeru

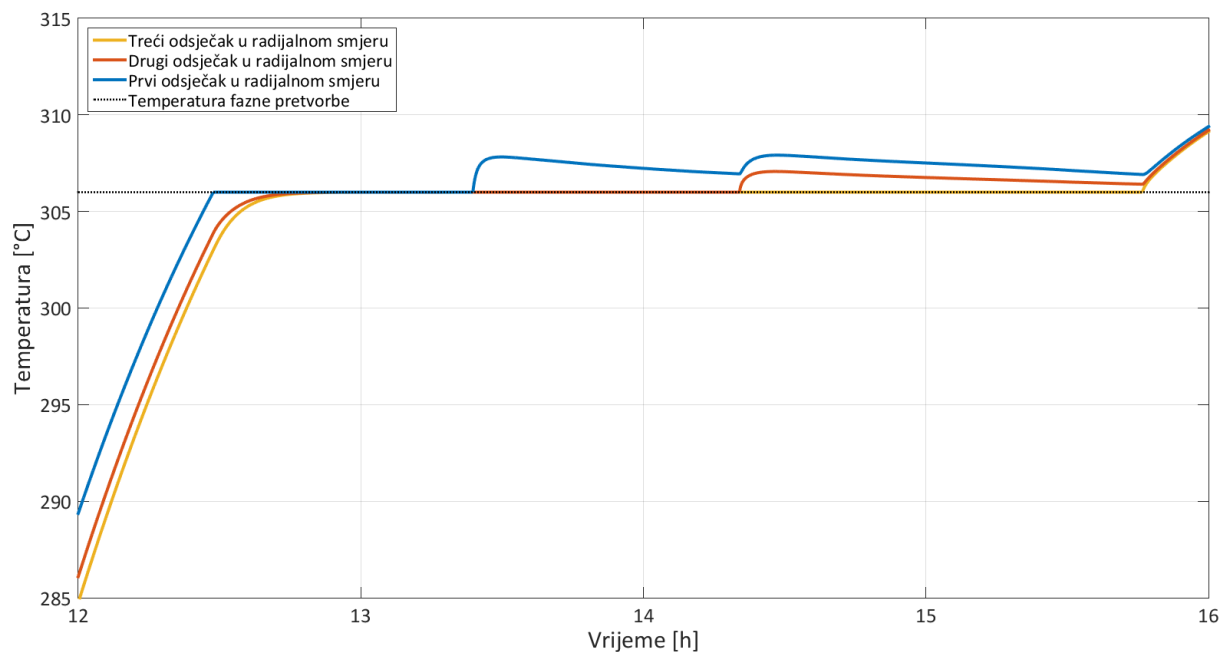


Slika 35. Temperaturni profil trećih odsječaka u radialnom smjeru, prikazani u aksijalnom smjeru

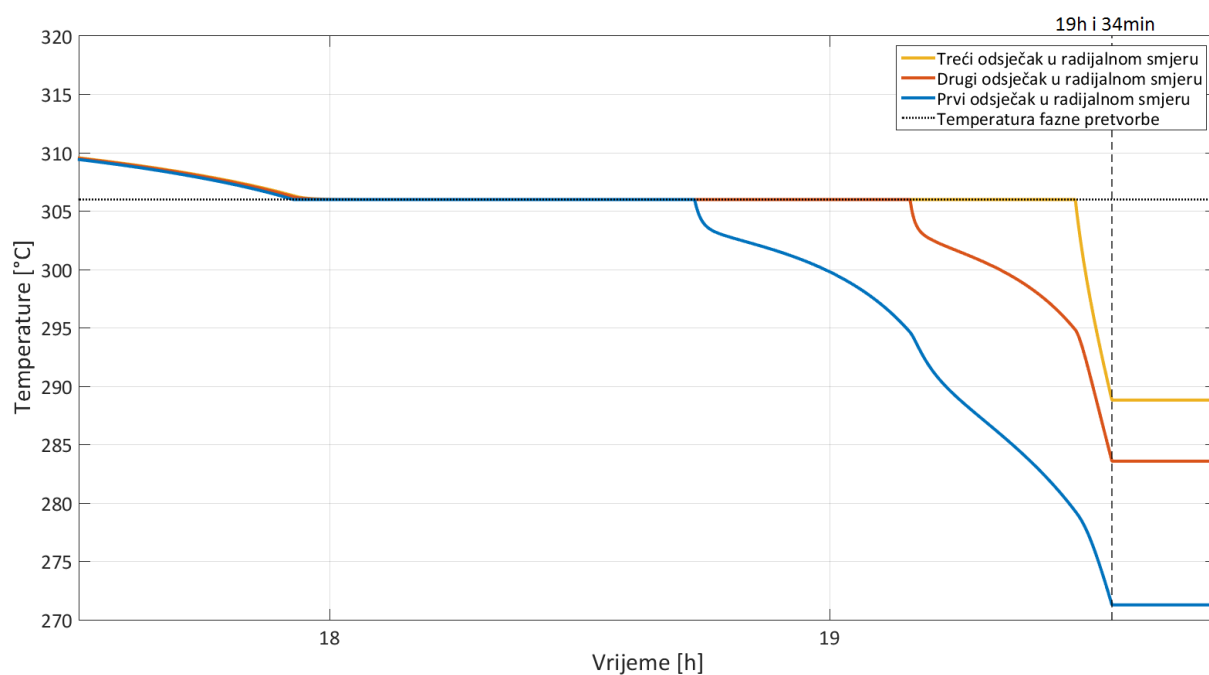
Iz gornjih dijagrama može se primijetiti kako temperature taljenja dostižu jedino prva dva odsječka u aksijalnom smjeru. Prikazivanjem temperaturnih profila medija za pohranu u radialnom smjeru predstaviti će se zaključak zašto samo prvi odsječki dostižu temperature taljenja.



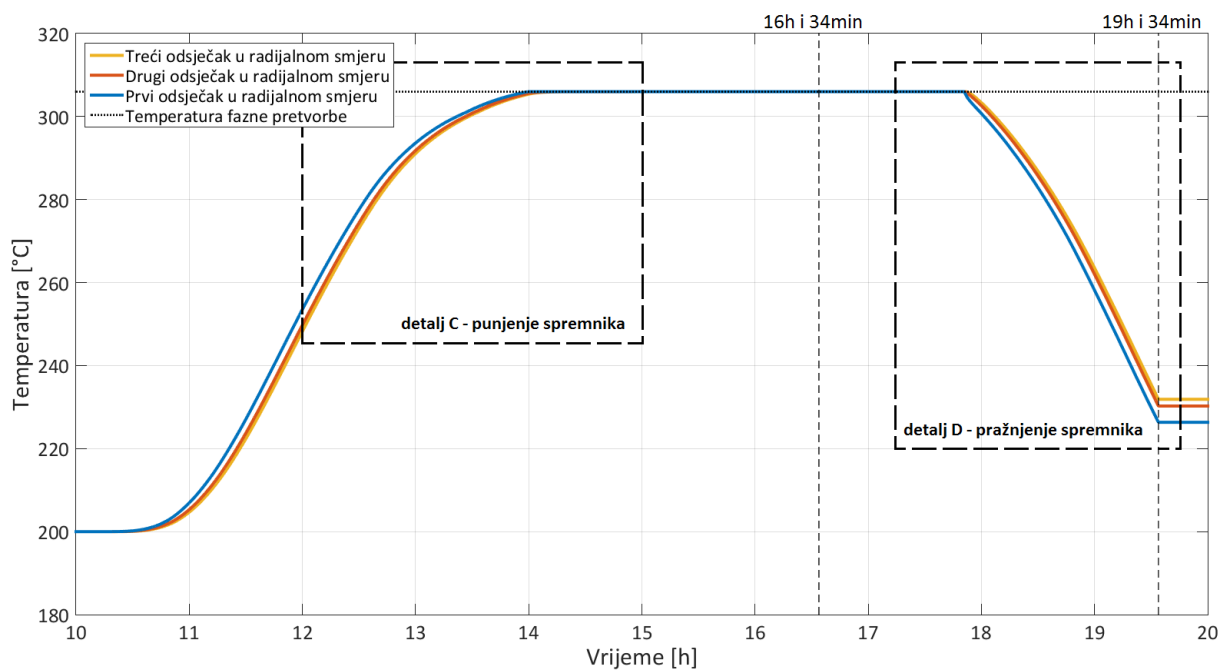
Slika 36. Temperaturni profil medija za pohranu toplinske energije u radijalnom smjeru prikazan za prvi odsječak u aksijalnom smjeru



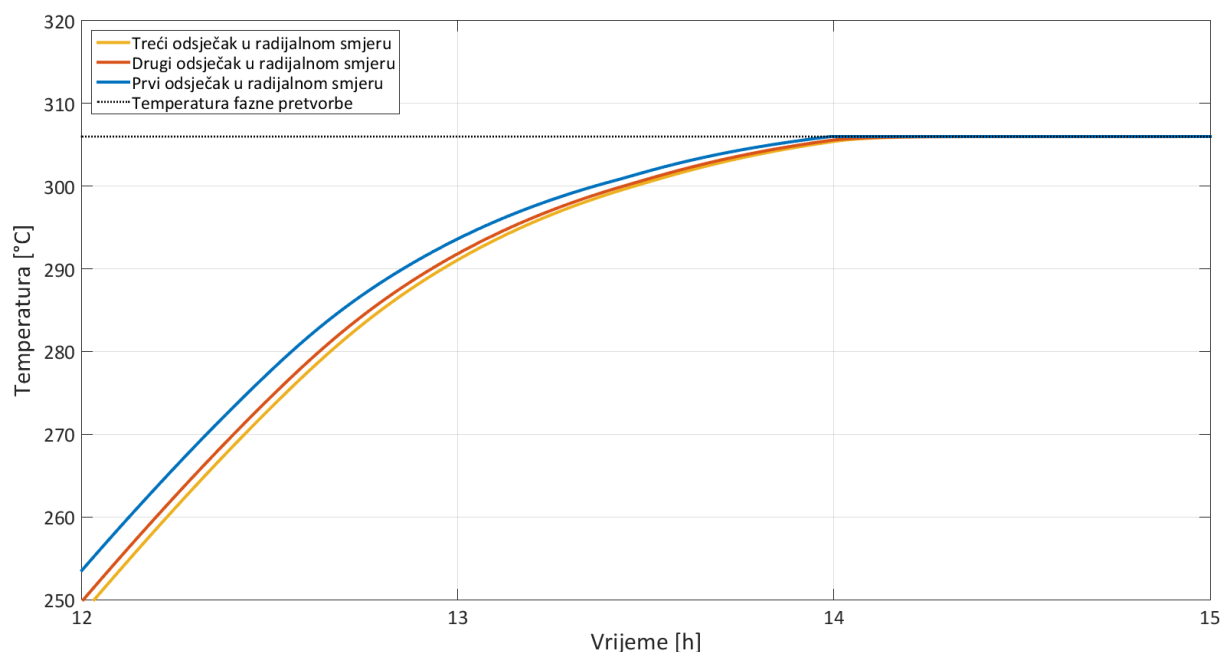
Slika 37. Detalj A – punjenje spremnika za medij u radijalnom smjeru za prvi odsječak u aksijalnom smjeru



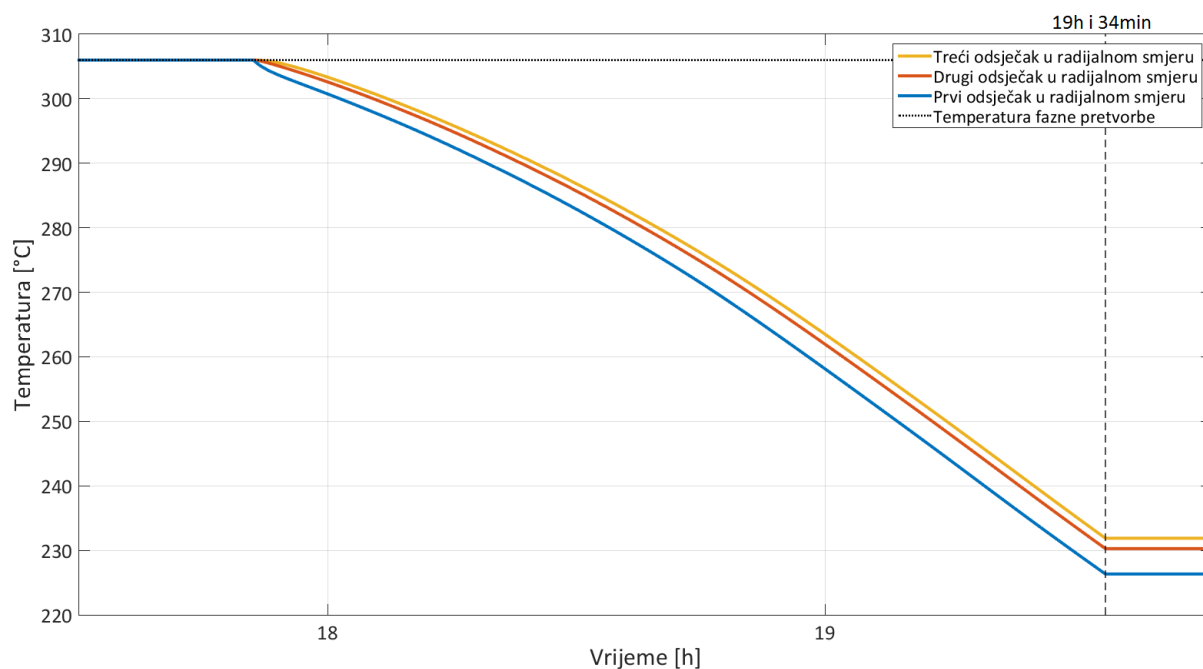
Slika 38. Detalj B – pražnjenje spremnika za medij u radijalnom smjeru za prvi odsječak u aksijalnom smjeru



Slika 39. Temperaturni profil medija za pohranu toplinske energije u radijalnom smjeru prikazan za drugi odsječak u aksijalnom smjeru

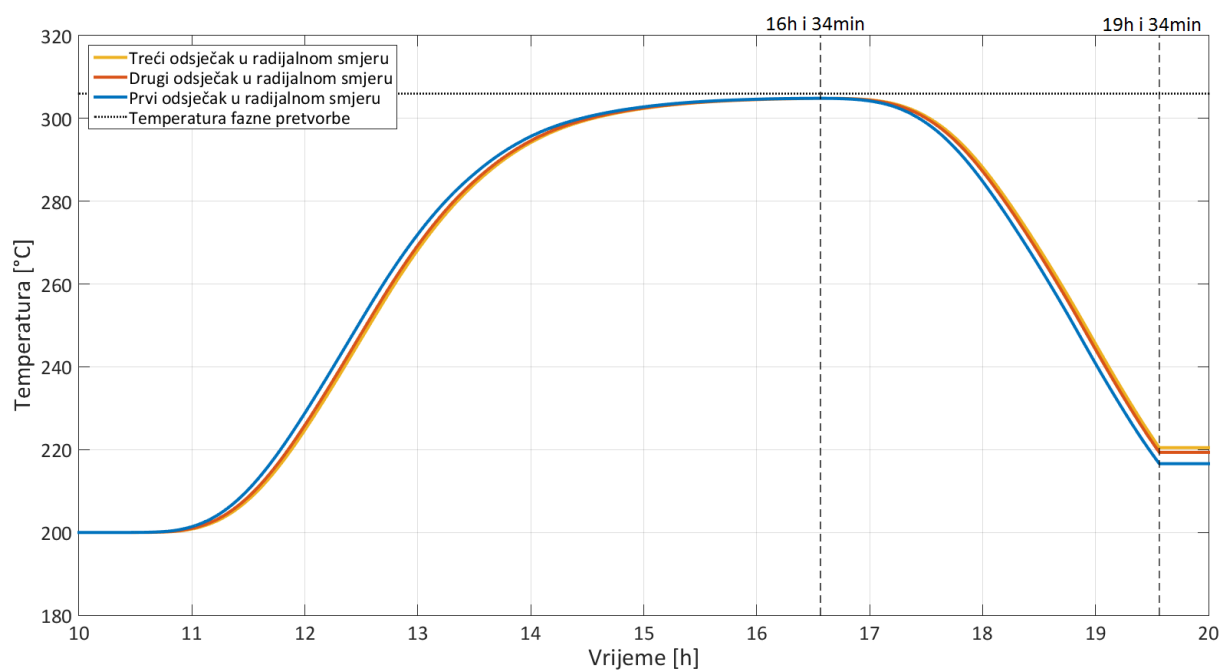


Slika 40. Detalj C – punjenje spremnika za medij u radialnom smjeru za drugi odsječak u aksijalnom smjeru

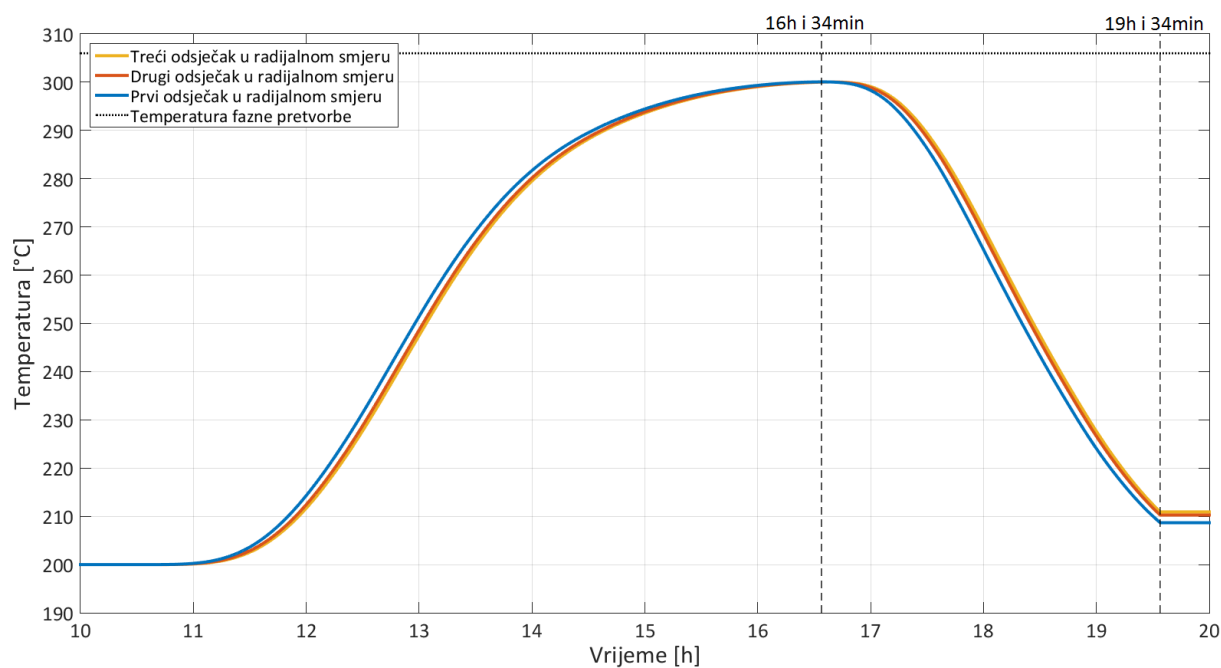


Slika 41. Detalj D – pražnjenje za medij u radialnom smjeru za drugi odsječak u aksijalnom smjeru

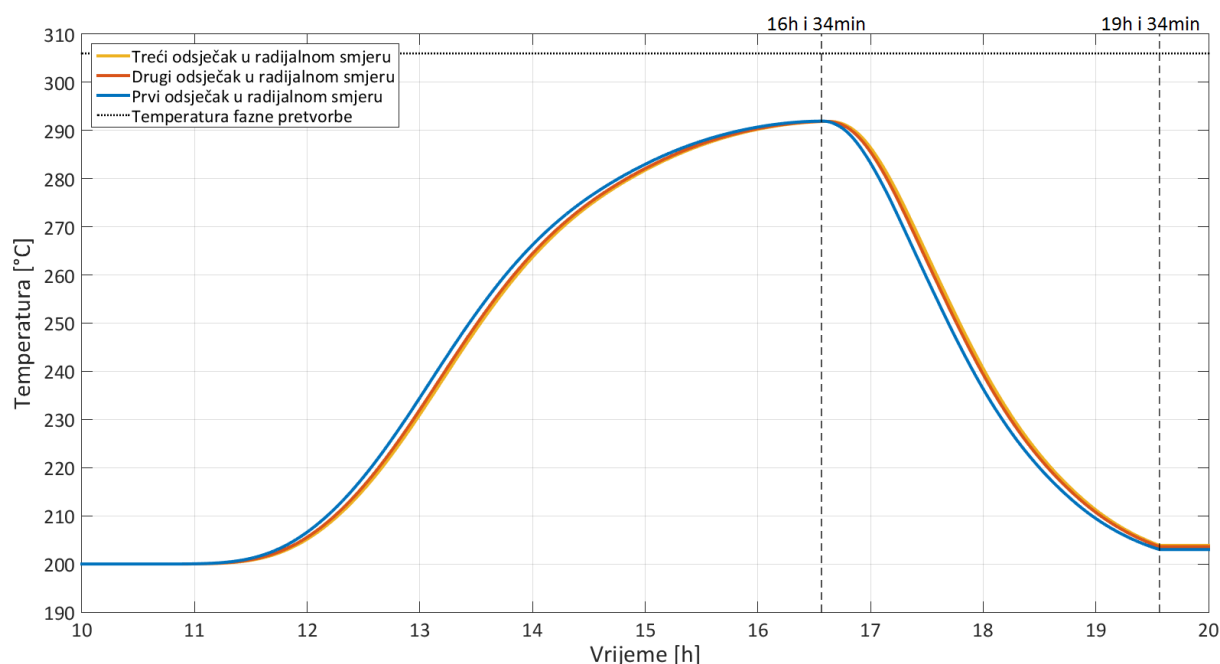
Na slikama od 36. do 41. može se primijetiti kako se medij u prvom aksijalnom odsječku jedini pregrijava preko temperature taljenja od 306 °C te kako se medij u drugom odsječku zagrijava do temperature taljenja te na kraju punjenja spremnika ostaje na istoj jer nije uskladištio dovoljno energije za potpunu promjenu agregatnog stanja.



Slika 42. Temperaturni profil medija za pohranu toplinske energije u radijalnom smjeru prikazan za treći odsječak u aksijalnom smjeru



Slika 43. Temperaturni profil medija za pohranu toplinske energije u radijalnom smjeru prikazan za četvrti odsječak u aksijalnom smjeru

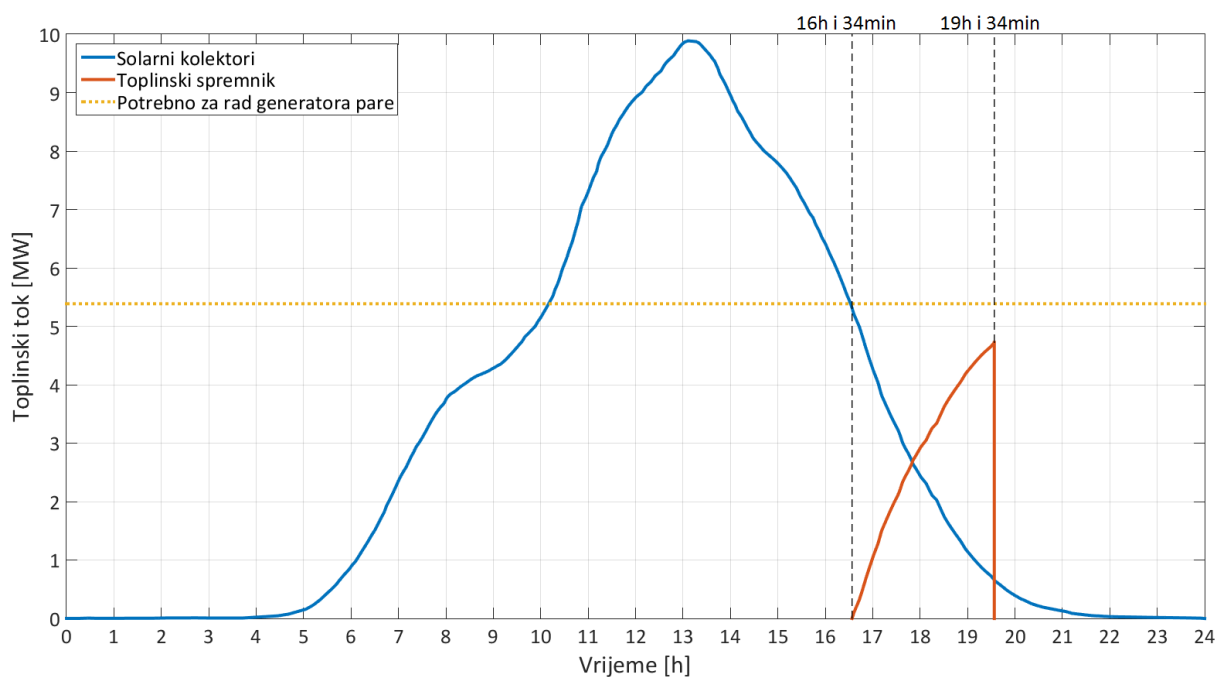


Slika 44. Temperaturni profil medija za pohranu toplinske energije u radijalnom smjeru prikazan za peti odsječak u aksijalnom smjeru

Na slikama od 42. do 44. može se primijetiti kako medij nije dostigao temperaturu taljenja te se ti odsječci ponašaju jednako kao i osjetni toplinski spremnik jer je uskladištena toplinska energija jedino u obliku osjetne topline spomenutih odsječaka. Tako i temperaturni profili imaju sličan oblik onim profilima dobiveni u simulaciji osjetnog toplinskog spremnika. Zbog toga nisu predloženi detaljni prikazi profila punjenja i pražnjenja 3., 4. i 5. odsječaka u aksijalnom smjeru. Može se primijetiti kako je najbrža promjena temperature u 5. aksijalnom odsječku što i ima smisla jer 5. aksijalni odsječak predstavlja ulaz hladne struje radnog medija u referentnu cijev.

Iz dijagrama temperaturnih profila medija za pohranu toplinske energije može se zaključiti kako medij ne dostiže proračunatu temperaturu nakon završetka punjenja spremnika odnosno kako spremnik nije uskladištio svu proračunatu toplinsku energiju za trosatno produljenje rada termoelektrane. Iako spremnik uspijeva zadovoljiti trosatno produljenje rada, uvelike se to omogućuje korištenjem toplinskog toka iz kolektora i nakon trenutka kada toplinski tok iz kolektora više nije dovoljan za stacionarni rad generatora pare. Razlog ne uskladištene ukupne proračunate toplinske energije je glavni nedostatak latentnih toplinskih spremnika. Problem predstavlja slaba izmjena topline između radnog medija i medija za pohranu topline. Točnije, problem niske toplinske provodnosti medija za pohranu topline te

time i nemogućnost pohrane ukupno proračunate toplinske energije. Tako uz sve prednosti latentnih spremnika dolazi i problem prolaza topline koji se uvelike pokušava, na razne konstrukcijske načine, riješiti te su neki i spomenuti u poglavlju 3.4. ovog rada.



Slika 45. Prikaz toplinskog toka koji se dobiva iz kolektorskog polja i toplinskog spremnika uz prikaz potrebnog toplinskog toka za stacionarni rad generatora pare

9. ZAKLJUČAK

Na temelju proračuna, matematičkog modela i provedene simulacije rada toplinskih spremnika mogu se izvući određeni zaključci. Kako je proračun spremnika, a i simulacija rada provedena za jednaki iznos toplinske energije usporedit će se efikasnost svakog spremnika, u smislu specifične pohrane toplinske energije i mogućnosti pohrane proračunate toplinske energije.

Proračunom osjetnog toplinskog spremnika dobivena je potrebna masa medija za pohranu kako bi se uskladištila toplinska energija jednaka izrazu (4.2). Tako je za skladištenje toplinske energije iznosa $Q = 60.3$ GJ potrebno 289.8 tona mase medija za pohranu, a njegov volumen iznosi 176.7 m^3 . Proračunom latentnog toplinskog spremnika, za isti iznos proračuna toplinske energije, potrebna masa medija fazne pretvorbe je 162.6 tona, volumena 77.4 m^3 , iz čega proizlazi glavna prednost latentnog toplinskog spremnika naspram osjetnog, a to je puno veća specifična pohrana toplinske energije. Tako je specifična pohrana toplinske energije za osjetni spremnik jednaka 208 MJ/kg , dok za latentni spremnik iznosi 370.7 MJ/kg .

Iako latentni toplinski spremnik ima veliku prednost u specifičnoj pohrani toplinske energije, niska toplinska provodnost kao glavni nedostatak latentnog spremnika, onemogućuje ga da u nepovoljnim režimima rada, raspoloživu toplinsku energiju pohrani u toplinski spremnik. Navedena pojava se može primijetiti na rezultatima simulacije toplinskih spremnika. Vidi se kako medij fazne pretvorbe nije postigao proračunom određenu temperaturu nakon punjenja spremnika, što znači da nije uspio uskladištiti proračunati iznos toplinske energije. Time se uvelike smanjuje mogućnost korištenja latentnih toplinskih spremnika za produljenje rada solarne termoelektrane. Kako bi se umanjio negativan utjecaj slabe toplinske provodnosti, fokus znanstvenih istraživanja u području CSP – a usmjeren je na potragu za boljim medijima za pohranu te pronalaženju učinkovitijih konstrukcijskih rješenja. Pregled određena rješenja može se vidjeti u poglavlju 3.4 ovog rada.

DODATAK

1. Matlab skripte

Latentni spremnik:

```

r=172000; % J/kg latentna toplina za NaNO3 (članak SODIUM
NITRATE...)
ro_pcm=2100; % kg/m^3 gustoća NaNO3
cp_k=1500; % J/kgK spec topl kapacitet krutog NaNO3
1353.013036
cp_t=1650; % J/kgK spec topl kapacitet tekućeg NaNO3
T_t=306+273.15; % K temperatura taljenja NaNO3
T_min=200+273.15; % K minimalna temperatura NaNO3
T_max=330+273.15; % K maksimalna temperatura NaNO3
T_stac=T_min;
h_t_p=cp_k*(T_t) ; % entalpija početka taljenja NaNO3
h_t_k=h_t_p+r; % entalpija NaNO3 nakon što je potpuno
rastaljena
h_stac=cp_k*(T_min);

sat=3; % h produljenje rada
A_kol=22*750; % m^2 površina kolektora (22 sklopa s površinom
750 m^2)
eta_kol=0.73; % iskoristivost kolektora
fi_gen_par=5386777; % snaga potrebna za generator pare
Q_gen_par=fi_gen_par*sat*3600; %J minimalno potrebna energija za
produljenje rada od 3 h
Q_spr=6.027145e+10; % J energija potrebna za 3 satno produljenje
rada (iz površine i insol)

M_PCM=Q_spr/(r+cp_k*(T_t-T_min)+cp_t*(T_max-T_t)); % ukupna masa
NaNO3
r1=0.078;
r2=0.08;
r3=0.15;
delta=(r3-r2)/3; % debljina odsječka
D1=r1*2; % [m] unutarnji promjer cijevi
D2=r2*2; % [m] vanjski promjer cijevi
D3=r3*2; % promjer NaNO3
L_N=M_PCM*4/ro_pcm/pi/(D3^2-D2^2); % umnožak duljine i broja cijevi
L=15; % m pretpostavljena visina spremnika
N=L_N/L; % broj potrebnih cijevi

cp_HTF=2275; % za XCEL THERM@LV
ro_HTF=870; % za XCEL THERM@LV
M_HTF=r1^2*pi*L*N*ro_HTF; % masa radnog medija

ro_s=7500; % gustoća stijenke čelika
M_s=(r2^2-r1^2)*pi*L*N*ro_s; % masa stijenke
c_s=461; % J/kgK specifični toplinski kapacitet čelika

m_gen=fi_gen_par/(cp_HTF*(T_max-T_min)); % maseni protok u gen pare
za FI gen pare

%%Toplinski tokovi%%

```

```

alpha_u=500; % Koeficijent prijelaza topline na unutarnjojs
stijenci
alpha_v=35; % Koeficijent prijelaza topline na vanjsoj stijenci
lambda_s=54; % Toplinska provodnost čelika

lambda_k=0.75; % Toplinska provodnost NaNO3
lambda_eq=4; % Ekvivalentna toplinska provodnost
lambda_l=lambda_k*lambda_eq; % Efektivna toplinska provodnost

ku=2*pi*L*N/(1/(alpha_u*r1)+1/lambda_s*log(r2/r1)); % prolaz topline
na unutarnjoj stijenci cijevi

k1_l=2*pi*L*N*alpha_v*r2;
k1_2=2*pi*L*N/log((r2+0.5*delta)/r2);

k12_l=2*pi*L*N/log((r2+delta)/(r2+0.5*delta));
k12_2=2*pi*L*N/log((r2+1.5*delta)/(r2+delta));

k23_l=2*pi*L*N/log((r2+2*delta)/(r2+1.5*delta));
k23_2=2*pi*L*N/log((r2+2.5*delta)/(r2+2*delta));

load('protokSaved.mat')

```

Osjetni spremnik

```

T_min=200; % K minimalna temperatura
T_max=330; % K maksimalna temperatura
T_stac=T_min;
cp_osj= 1600 ; % spec topl tok HITECdž sa prezentacije
ro_osj= 1640; % gustodž a HITECdž sa prezentacije

sat=3; % h produljenje rada
A_kol=22*750; % m^2 povrđž ina kolektora (22 sklopa s površinom
750 m^2)
eta_kol=0.73; % iskoristivost kolektora
fi_gen_par=5386777; % snaga potrebna za generator pare
Q_gen_par=fi_gen_par*sat*3600; %J minimalno potrebna energija za
produljenje rada od 3 h
Q_spr=6.027145e+10; % J energija potrebna za 3 satno produljenje
rada (iz površine i insol)

M_osj=Q_spr/(cp_osj*(T_max-T_min)); % ukupna masa HITEC
r1=0.038;
r2=0.04;
r3=0.15;
delta=(r3-r2)/3; % debljina odsjedžž ka
D1=r1*2; % [m] unutarnji promjer cijevi
D2=r2*2; % [m] vanjski promjer cijevi
D3=r3*2; % promjer HITEC

L_N=M_osj*4/ro_osj/pi/(D3^2-D2^2); % umnozак duljine i broja cijevi
L=15; % visina spremnika
N=L_N/L; % broj potrebnih cijevi

cp_HTF=2275; % za XCELTHERM LV
ro_HTF=870; % za XCELTHERM LV
M_HTF=r1^2*pi*L*N*ro_HTF; % masa radnog medija

ro_s=7500; % gustodžž a stijenke džž elika
M_s=(r2^2-r1^2)*pi*L*N*ro_s; % masa stijenke

```

```

c_s=461;      % J/kgK specifični toplinski kapacitet čelika
(toplinske tablice)

m_gen=fi_gen_par/(cp_HTF*(T_max-T_min));      % maseni protok u gen
pare za FI gen pare

%%Toplinski tokovi%%

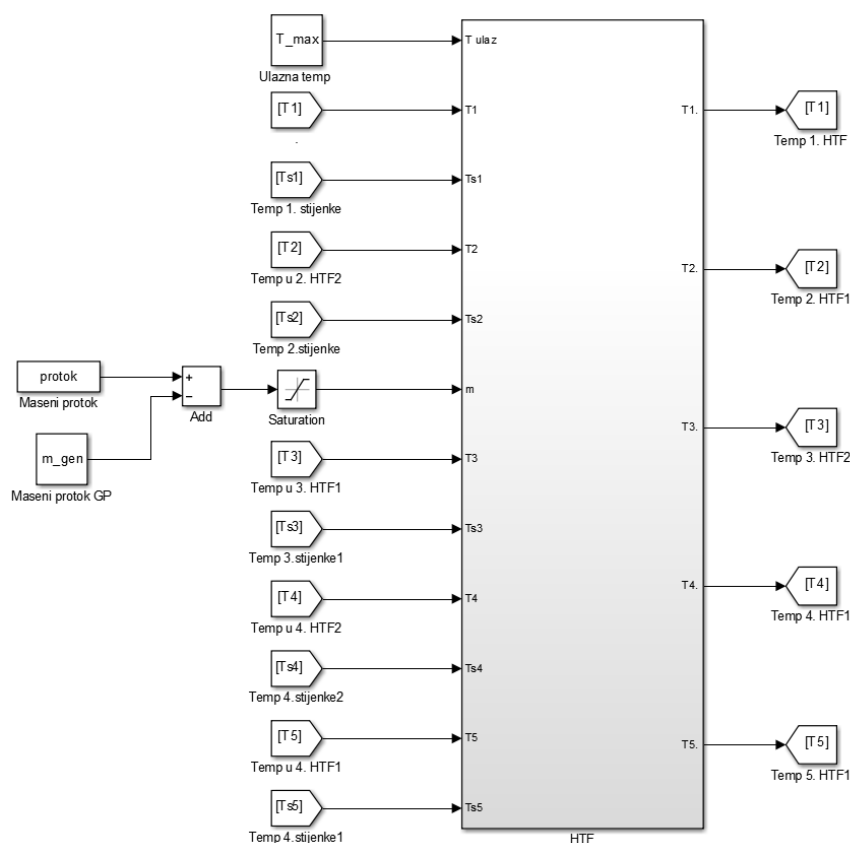
alpha_u=500;      % Koeficijent prijelaza topline na unutarnjoj
stijenci
alpha_v=35;      % Koeficijent prijelaza topline na vanjskoj stijenci
lambda_s=54;      % Toplinska provodnost čelika
lambda_osj=1.73*0.32;      % Toplinska provodnost medija za pohranu
lambda_osj_eqv=4;      % Ekvivalentna toplinska provodnost
lambda_p=lambda_osj_eqv*lambda_osj; % Efektivna toplinska provodnost

ku=2*pi*L*N/(1/(alpha_u*r1)+1/lambda_s*log(r2/r1)); % prolaz topline
na unutarnjoj stijenci cijevi
k2=2*pi*L*N*alpha_v*r2+2*pi*L*N*lambda_p/log((r2+0.5*delta)/r2); %
konvekcija sa stijenske na prvi segment
k12=2*pi*L*N*lambda_p/log((r2+1.5*delta)/(r2+0.5*delta)); % prolaz
topline sa 1 na 2
k23=2*pi*L*N*lambda_p/log((r2+2.5*delta)/(r2+1.5*delta)); % prolaz
topline sa 2 na 3

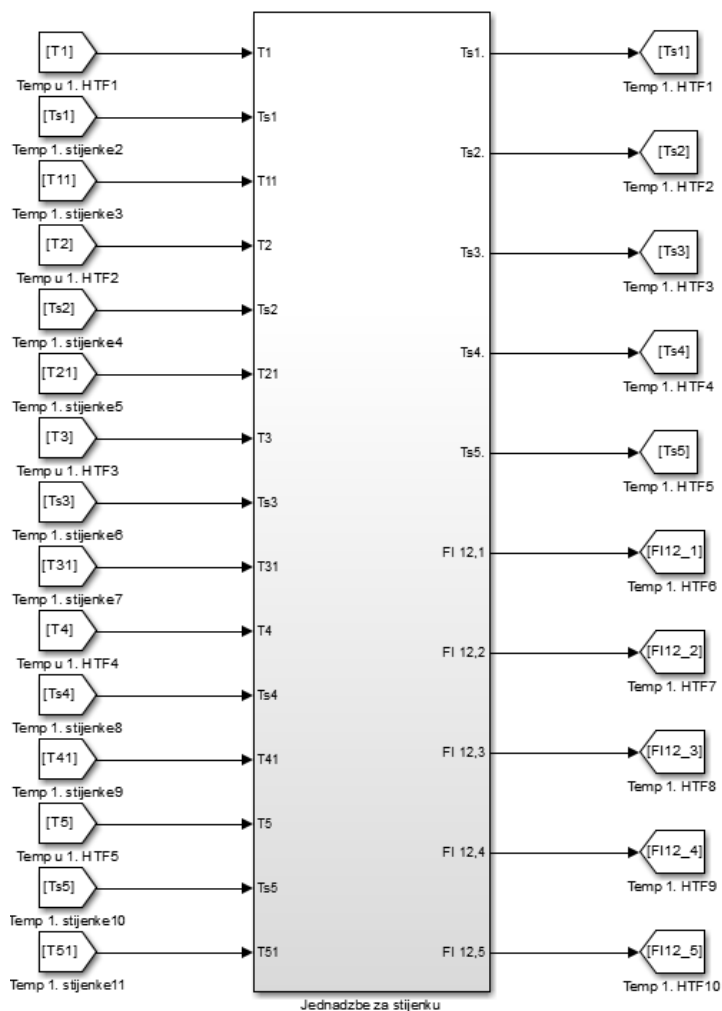
```

2. Simulink model

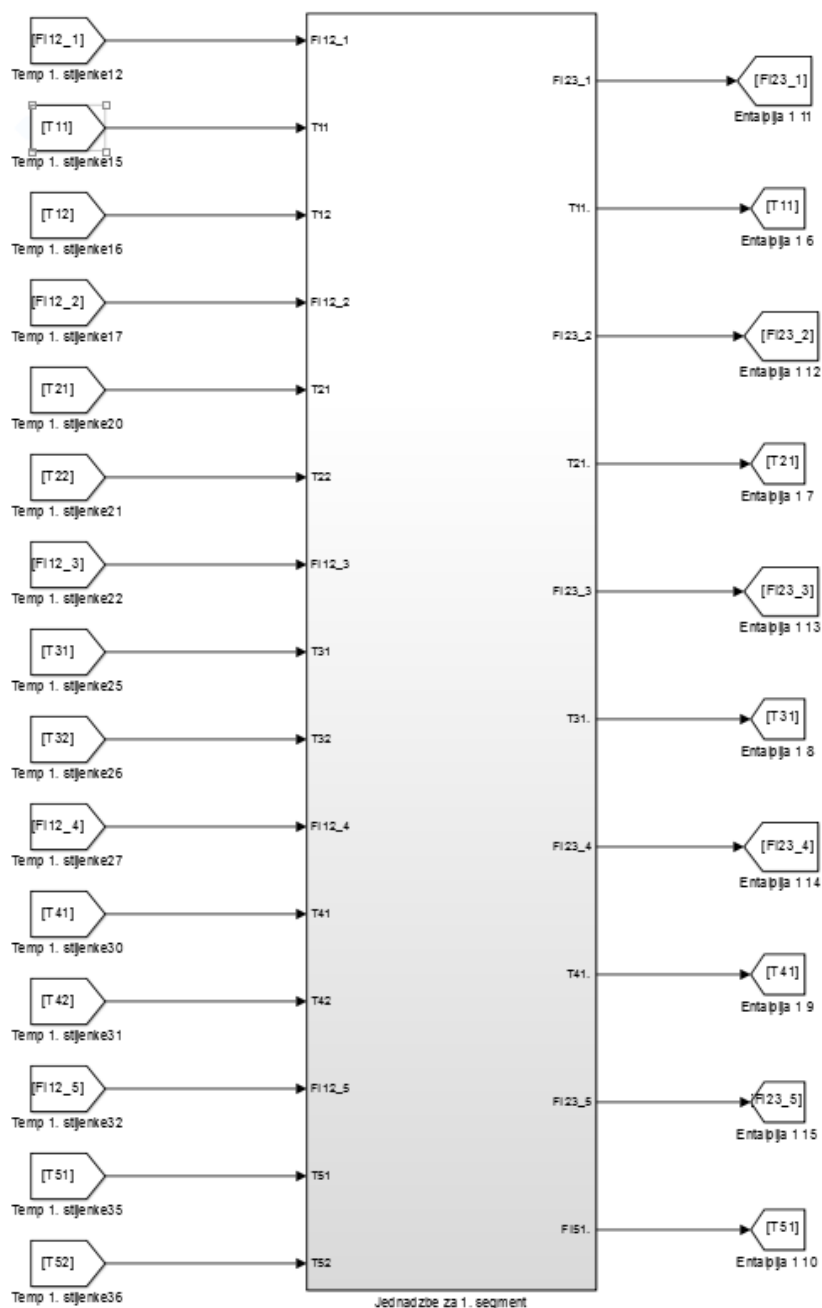
Modeli latentnog i osjetnog spremnika su slični stoga će biti prikazani model za općeniti toplinski spremnik



Slika 46. Simulink model radnog medija (HTF)



Slika 47. Simulink model stijenske cijevi



Slika 48. Simulink model odsječaka u radijalnom smjeru

Model odsječaka jednaki su za sva 3 stoga je prikazana struktura modela samo jednog odsječaka.

LITERATURA

- [1] Hrvatska udruga za smanjenje ugljičnog otiska
<http://www.huco2.eu/hr/aktualno/cop-21.aspx>, datum pristupa 19.12.2016.
- [2] Obnovljivi.com – Povijest korištenja energije sunca
<http://www.obnovljivi.com/energija-sunca/50-povijest-koristenja-energije-sunca?showall=1>, datum pristupa 19.12.2016.
- [3] M. Ragheb, Solar thermal power and energy storage historical perspective, 9.10.2014
- [4] Renewables 2016 Global Status Report, REN21 Secretariat, Paris; France
- [5] UCL Institute for Sustainable Resources Blog – CSP vs PV – Understanding the current situation and future outlook
<https://blogs.ucl.ac.uk/sustainable-resources/2015/11/30/csp-vs-pv-understanding-the-current-situation-and-future-outlook/>, datum pristupa 21.12.2016
- [6] CSP – SunShot Summit Plenary Presentation – Beyond LCOE: The Value of CSP with Thermal Energy Storage, Mark S. Mehos, Program Manager, CSP NREL
<http://www.astri.org.au/wp-content/uploads/2014/11/MARK-CSP-SunShot-Summit-Plenary-Presentation-Mehos-April-2016-Final.pdf>, datum pristupa 22.12.2016
- [7] Summary Report for Concentrating Solar Power Thermal Storage Workshop, G. Glatzmaier, 20.5.2011.
- [8] Comparing the Net Cost of CSP – TES to PV Deployed with Battery Storage, Jennie Jorgenson, Mark Mehos, Paul Denholm, Published by the American Institute of Physics, svibnja 2016.
- [9] Solar Thermal Electricity – Global Outlook 2016, Greenpeace International, ESTELA, SolarPACES, 2016.
- [10] GeosUN Africa – Mapa direktnog solarnog zračenja
<http://geosun.co.za/solar-maps/>, datum pristupa 26.12.2016.
- [11] Organic Rankine cycle – Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Organic_Rankine_cycle, datum pristupa 26.12.2016.
- [12] Klimatizacija – Uvod u klimatizaciju, FSB, Doc.dr.sc Darko Smoljan
- [13] Thermal Storage System Development for a 1 MW CSP Pilot Using an Organic Rankine Cycle, Abdelaziz Mimmet, Abdelmalek Essaadi University, rujan 2014.

- [14] Analysis of Heat Storage With A Thermocline Tank For Concentrated Solar Plants, Albert Graells Viella, Sabanci University, proljeće 2014.
- [15] Thermal Energy Storage – Technology Brief, IEA – ETSAP i IRENA, 2013.
- [16] University of Strathclyde Glasgow – Hybrid Energy System in Future Low Carbon Buildings – Thermal Storage Background Information
http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/09-10/Hybrid_systems/thermal-storage.htm, datum pristupa 26.12.2016.
- [17] Thermal energy storage – overview and specific insight into nitrate salts for sensible and latent heat storage, Beilstein Journal of Nanotechnology
<http://www.beilstein-journals.org/bjnano/single/articleFullText.htm?publicId=2190-4286-6-154>, datum pristupa 26.12.2016.
- [18] Research team in PCM storage breakthrough, New Energy Update
<http://analysis.newenergyupdate.com/csp-today/technology/research-team-pcm-storage-breakthrough>, datum pristupa 26.12.2016.
- [19] Concentrating Solar Thermal Storage System Basics, Energy.gov
<https://energy.gov/eere/energybasics/articles/concentrating-solar-power-thermal-storage-system-basics>, datum pristupa 26.12.2016.
- [20] Modeling and control of solar thermal power plant with thermal energy storage, Kody M. Powell, Thomas F. Edgar, 16.12.2011.
- [21] Prikaz postrojenja s indirektnim osjetnim toplinskim spremnikom, Energy research for application
<http://www.bine.info/en/publications/publikation/solarthermische-kraftwerke-werden-praxis/>, datum pristupa 26.12.2016.
- [22] Prospects and problems of concentrating solar power technologies for power generation in the desert region, Xinhai Xu, Kandasamy Vignarooban, Ben Xu, A. M. Kannan, 10.1.2016
[https://www.researchgate.net/publication/283465427 Prospects and problems of concentrating solar power technologies for power generation in the desert regions](https://www.researchgate.net/publication/283465427_Prospects_and_problems_of_concentrating_solar_power_technologies_for_power_generation_in_the_desert_regions), datum pristupa 26.12.2016.
- [23] Functionality of sorptive thermal storage systems, Simone Mack, Siegfried Egner

- <http://www.igb.fraunhofer.de/en/research/competences/physical-process-technology/heat-and-sorption-systems/sorptive-heat-storage/thermal-storage-methods.html>, datum pristupa 26.12.2016.
- [24] Matematički model dinamike procesa u spremniku latentne topline, Petar Krešimir Vuger, 21. veljače 2014.
- [25] Multi-layered solid-PCM thermocline thermal storage for CSP. Numerical evaluation of its application in a 50MWe plant, Pedro Andrés Galione, Carlos-David Perez-Segarra, Ivette Rodriguez, Joaquim Rigola, lipanj 2015.
- [26] Heat Storage Based on PCM for Concentrated Solar Power Applications, Jan Kragbčec i Nis Peter Reinholdt, 9.06.2011.
- [27] Solar thermal energy , Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_thermal_energy, datum pristupa 26.12.2016.
- [28] Concentrated solar power – Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Concentrated_solar_power, datum pristupa 26.12.2016.
- [29] Ourzazate Solar Power Station – Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Ouarzazate_Solar_Power_Station, datum pristupa 26.12.2016.
- [30] ISOVER Saint-Gobain, ISOVER supplies insulation for the Ourzazate solar power station in Morocco
<http://www.isover.com/news/isover-supplies-insulation-ouarzazate-solar-power-station-morocco>, datum pristupa 27.12.2016.
- [31] Model male solarne termoelektrane s organskim Rankineovim ciklusom, FSB, Jakov Močibob, Zagreb, 2010.
- [32] Svojstva radnog fluida XCEL THERM®LV,
<http://www.radcoind.com/solar/>, datum pristupa 27.12.2016.
- [33] Svojstva paraboličnih kolektora SkyFuel
<http://www.skyfuel.com/skytrough.shtml>, datum pristupa 27.12.2016.
- [34] Sodium Nitrate for high temperature latent heat storage, T. Bauer, D. Laing, U. Kröner, R. Tamme, Institute of Technical Thermodynamics, German Aerospace Center (DLR), lipanj 2009.

- [35] Thermal characterization of HITEC molten salt for energy storage in solar linear concentrated technology, A. G. Fernandez, H. Galleguillos, E. Fuentealba, F. J. Perez, 16. travnja 2015
- [36] Energy Storage Technology for Concentrating Solar Power, Center for Clean Energy Technology Chinese Academy of Science, prezentacija
- [37] General volume sizing strategy for thermal storage system using phase change material for concentrated solar thermal power plant, Ben Xu, veljača 2015.
- [38] Comparison of CFD Natural Convection and Conduction-only Models for Heat Transfer in the Yucca Mountain Project Drifts, Teklu Hadgu, Stephen W. Webb, and Michael T. Itamura, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87 185
- [39] Spremnici topline – Wikipedija,
https://hr.wikipedia.org/wiki/Spremnici_topline, datum pristupa 26.12.2016
- [40] Concentrating solar power – ENERGY.GOV
<https://energy.gov/eere/sunshot/concentrating-solar-power>, datum pristupa 22.02.2017.
- [41] Predavanja kolegija Voda, gorivo, mazivo E, Katedra za inženjerstvo vode i okoliša.